

**Thermomechanische Analyse  
von thermoelektrischen Generatoren  
unter dynamischer Last im Kfz**

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Abteilung Maschinenbau und Verfahrenstechnik der  
Universität Duisburg-Essen  
zur Erlangung des akademischen Grades  
einer  
Doktorin der Ingenieurwissenschaften  
Dr.-Ing.

genehmigte Dissertation

von

Marlis Morschel  
aus  
Dinslaken

Tag der mündlichen Prüfung: 23. November 2016

Gutachter:  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Dieter Schramm  
Univ.-Prof. Dr.-Ing Holger Hirsch  
Prof. Dr. rer. nat. Georg Bastian



---

# Danksagung

---

„Experience is what you get when you didn't get what you wanted.“

Randy Pausch

Diese Arbeit zu verfassen erwies sich als die bisher größte Herausforderung meines Lebens. Zu Beginn glaubte ich eine Vorstellung davon zu haben, was mich in den nächsten Jahren erwarten würde. Am Ende bin ich um die Erfahrung reicher, dass die Realität nichts mit dieser Vorstellung zu tun hatte.

An erster Stelle gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. Georg Bastian, der mich dabei unterstützte diese Herausforderung zu meistern. Der wissenschaftliche Austausch und die Motivation durch neue Denkansätze haben zur Entstehung der Arbeit beigetragen. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr. Dieter Schramm für das mir entgegengebrachte Vertrauen. Die Kooperation mit der Hochschule Rhein-Waal hat eine Realisierung der Arbeit in dieser Form erst ermöglicht. Für die Übernahme des Drittgutachtens möchte ich außerdem Herrn Prof. Dr. Holger Hirsch danken.

Danken möchte ich außerdem meiner Familie und meinen Freunden für das Verständnis, dass mir in den letzten Jahren entgegengebracht wurde.

Ebenso bedanke ich mich bei Claudio Abels, Martin Koppers, Frank Küppers, Angelika Michel und Nick Mockus sowie allen weiteren Kollegen der Fakultät Technologie und Bionik und vom Lehrstuhl für Mechatronik. Durch die Unterstützung,

zeitweilige Ablenkung und die aufbauenden Worte erinnere ich mich gerne an die Zeit zurück.

Ein besonderer Dank gilt meinen Eltern Helga und Heinz Morschel. Sie haben mich mit dem Ehrgeiz, dem Durchhaltevermögen, der Neugier und dem Optimismus ausgestattet, die notwendig waren, um ein solches Projekt zu bewältigen. Ihre selbstverständliche Überzeugung von meinem Können ist mir noch immer ein Rätsel.

Zu guter Letzt möchte ich Benjamin Hesse danken. Sein Vertrauen und Verständnis, seine Unterstützung und Kraft, seine Verlässlichkeit und sein Rückhalt gaben mir die notwendige Energie, um diese Arbeit erfolgreich abzuschließen.

Danke

---

# Kurzfassung

---

Thermoelektrische Generatoren (TEG) überführen das thermische Potential einer Temperaturdifferenz in elektrische Energie. Ursprünglich wurden sie nur in der Raumfahrttechnik zur Stromversorgung von Raumsonden und als Thermoelemente zur Temperaturmessung eingesetzt. Mit Voranschreiten der Materialentwicklung wurden sie auch für den Alltag interessant. Prozesse, die Abwärme erzeugen oder auch kleinste Temperaturdifferenzen zwischen einem Körper und der Umgebung können von TEG genutzt werden, um elektrische Energie bereit zu stellen.

Die beim Betrieb eines Kfz anfallende Abgaswärme bietet ebenfalls Potential für den Einsatz eines thermoelektrischen Generators. Besonders die künftige Entwicklung der Kraftstoffpreise und die gesetzlichen Vorgaben zur CO<sub>2</sub>-Reduktion stellen eine Motivation dar, die Bestrebungen einer TEG-Integration in den Abgasstrang eines Kfz voranzutreiben.

Vor diesem Hintergrund wird die Effizienz einer thermoelektrischen Wandlung bei der Belastung mit Temperaturen eines realen Fahrzyklus untersucht. Die Abgas- und Kühlkreislauftemperaturen werden von einer numerischen Simulation bereitgestellt und dienen als Eingangsgrößen eines Messgeräts. Mit Hilfe der verwendeten Messtechnik können die generierte thermoelektrische Leistung und der Wirkungsgrad der Wandlung analysiert werden. Weiterhin wird die thermomechanische Belastung während eines Fahrzyklus untersucht. Die Belastung eines TEG mit sehr unterschiedlichen, stark variierenden Temperaturen über die Lebensdauer eines Kfz stellt besondere Herausforderungen an den Generator.

Die Ergebnisse zeigen, dass die TEG die bereitgestellte thermische Energie erfolgreich in elektrische Energie umwandeln. Dennoch müssen bei einer Systemintegration weitere Aspekte, wie Zusatzgewicht, Kosten und auch die thermomechanische Belastung, berücksichtigt werden. Es wird ersichtlich, dass die Belastungen und besonders die häufigen Lastwechsel bereits nach kurzer Zeit zum Versagen der TEG führen. Aus diesem Grund ist eine Integration der aktuell verfügbaren Module in den Abgasstrang eines Kfz nicht zielführend. Materialentwicklungen und Geometrie Anpassungen können jedoch zukünftig dazu führen, dass diese Anwendung denkbar wird.

---

# Abstract

---

Thermoelectric generators (TEG) transfer the thermal potential of a temperature difference to electrical energy. Originally, TEGs were used in space technologies to supply space probes or as thermocouples to measure the temperature. Improvements in material engineering have led to growing interest for daily life usage. Processes which produce waste heat or least temperature differences between a body and its surrounding can be used to provide electrical energy.

The generated exhaust gas, which is released during the operation of a vehicle, offers the potential for applying a thermoelectric generator. Especially, the future development of fuel prices and legal specifications for the CO<sub>2</sub>-reduction are a motivation for pushing the attempt of an integration of TEGs in the exhaust gas system of vehicles.

Against this background the efficiency of a thermoelectric conversion, being stressed with temperatures of a realistic cycle, is investigated. The needed exhaust gas temperatures and the needed cooling cycle temperatures for the measurement result from a numeric simulation. These parameters serve as an input for a measurement device. By means of the used measurement technique, the generated power and the conversion efficiency can be analyzed. Additionally the thermomechanical stress during a driving cycle is investigated. Stressing a TEG with different and greatly varying temperatures over the lifetime of a vehicle represents a special challenge for a TEG.

The results show, that the TEG successfully converts the available thermal energy into electrical energy. Nevertheless, further aspects, like additional weight, costs

and the thermomechanical stress, have to be considered when integrating a TEG in the exhaust gas system of a vehicle. It becomes apparent, that the high stresses and the high number of load changes lead to a failure of today's TEG after a short period of time. Due to this reason an integration of the present TEGs is not expediently. Future material development and modifications of the geometry may enhance the use of TEG in the mentioned application.



---

# Inhaltsverzeichnis

---

<b>Notation</b>	<b>xiii</b>
<b>1 Motivation und Aufbau der Arbeit</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation . . . . .	1
1.2 Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext . . . . .	4
1.3 Ziele und Aufbau . . . . .	6
<b>2 Stand der Technik</b>	<b>9</b>
2.1 Thermische Rekuperation im Kfz . . . . .	9
2.2 Bekannte Konzepte zur Abgaswärmenutzung . . . . .	11
2.2.1 Abgaswärmenutzung zur Innenraumklimatisierung . . . . .	12
2.2.2 Abgaswärmenutzung zur Kaltstartverkürzung . . . . .	13
2.2.3 Abgaswärmenutzung zur Wandlung in andere Energieformen	14
2.3 Thermoelektrische Effekte . . . . .	18
2.3.1 Der Seebeck-Effekt . . . . .	18
2.3.2 Die Ursache des Seebeck-Effekts . . . . .	21
2.3.3 Der Peltier-Effekt . . . . .	22
2.3.4 Der Thomson-Effekt . . . . .	23
2.4 Modulaufbau und Material . . . . .	25
2.4.1 Aufbau eines TEG . . . . .	26
2.4.2 Grundlagen des Wärmetransports . . . . .	28
2.4.3 Wirkungsgrad und Gütezahl . . . . .	32
2.4.4 Materialentwicklungen . . . . .	36
2.5 Bisherige Anwendungen und künftige Entwicklungen . . . . .	38
2.6 Grundlagen der Thermomechanik . . . . .	39
2.6.1 Thermisches Verhalten eines Körpers . . . . .	39
2.6.2 Mechanisches Verhalten eines Körpers . . . . .	41

<b>3</b>	<b>Messtechnik zur Analyse von TEG</b>	<b>45</b>
3.1	Herausforderungen bei der Charakterisierung . . . . .	45
3.2	Möglichkeiten zur Charakterisierung von TEG . . . . .	47
3.2.1	Harman-Methode . . . . .	48
3.2.2	Wärmestromermittlung . . . . .	50
3.3	Verwendete Messtechnik . . . . .	51
3.3.1	Leistungsbilanz . . . . .	52
3.3.2	Temperaturregelung des Messgeräts . . . . .	55
3.3.3	Erweiterung der Messtechnik . . . . .	59
3.3.4	Electronic Speckle Pattern Interferometry . . . . .	60
3.4	Mechanische Lastsituation . . . . .	62
3.4.1	FEM-Simulation des thermomechanischen Verhaltens . . . . .	62
3.4.2	Parameter der FEM-Simulation . . . . .	63
<b>4</b>	<b>Untersuchungsmethodik und betrachtete Fahrzyklen</b>	<b>65</b>
4.1	Bedeutung der durchgeführten Messungen . . . . .	66
4.1.1	Vorbereitende Messungen . . . . .	66
4.1.2	Effizienzmessungen . . . . .	67
4.1.3	Realistische Lastfälle für Kraftfahrzeuge . . . . .	68
4.2	Betrachtung verschiedener Fahrzyklen . . . . .	71
4.2.1	Temperaturprofil einer Stadtfahrt . . . . .	72
4.2.2	Temperaturprofil einer Landstraßenfahrt . . . . .	73
4.2.3	Temperaturprofil einer Autobahnfahrt . . . . .	74
4.2.4	Temperaturprofil des NEFZ . . . . .	75
4.3	Auswahl der Prüflinge . . . . .	76
<b>5</b>	<b>Analyse elektrischer und thermomechanischer Eigenschaften</b>	<b>79</b>
5.1	TEG-Charakterisierung bei konstanter Belastung . . . . .	79
5.1.1	Durchführung der Leistungsanpassung . . . . .	80
5.1.2	Maximale Leistung bei konstanter Belastung . . . . .	80
5.1.3	Wirkungsgrad bei konstanter Belastung . . . . .	82
5.2	TEG-Charakterisierung bei wechselnder Belastung . . . . .	83
5.2.1	Maximale Leistung bei wechselnder Belastung . . . . .	85
5.2.2	Wirkungsgrad bei wechselnder Belastung . . . . .	87
5.3	Analyse des thermomechanischen Verhaltens . . . . .	88
5.3.1	FEM-Analyse eines TEG . . . . .	89
5.3.2	Analyse der freien Verformung mittels ESPI . . . . .	91
5.4	Messung der Verformung unter Last . . . . .	92
<b>6</b>	<b>Optimierter TEG-Einsatz</b>	<b>97</b>
6.1	Beispiele für zukünftige Anwendungen . . . . .	98
6.2	Geometrieoptimierung . . . . .	98
6.3	Der TEG im Hybrid . . . . .	99
6.3.1	Erstellen einer angepassten Betriebsstrategie . . . . .	100
6.3.2	Angepasster Temperaturverlauf . . . . .	102

---

6.4	Alternative Belastungsfälle . . . . .	103
6.4.1	Regenerative thermische Oxidation . . . . .	103
6.4.2	Ein Bootsmotor als mögliche Anwendung . . . . .	105
<b>7</b>	<b>Fazit</b>	<b>107</b>
7.1	Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse . . . . .	107
7.2	Wissenschaftlicher Beitrag der Arbeit . . . . .	110



---

# Notation

---

## Verwendete Symbole

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
---------------	---------	-----------

---

Lateinische Buchstaben:

$A$	$\text{m}^2$	Fläche
$A_1$	$\text{m}^2$	Fläche 1
$a$	$1/\text{K}$	Wärmeausdehnungskoeffizient
$a_A$	$1/\text{K}$	Wärmeausdehnungskoeffizient des Materials A
$d$	$\text{N}/\text{m}$	Federkonstante
$E$	$\text{V}/\text{m}$	elektrische Feldstärke
$e$	$\text{C}$	Elementarladung ( $1,602\,176\,565 \times 10^{-19} \text{ C}$ )
$E_A$	$\text{N}/\text{m}^2$	Elastizitätsmodul des Materials A
$E_{\text{mech}}$	$\text{J}$	Generierte mechanische Energie des ORC
$F_0$	$\text{N}$	Vorspannkraft
$F_F$	$\text{N}$	Federkraft
$F_{\text{mess}}$	$\text{N}$	Gemessene Kraft der Verformung
$H$	$\%$	Häufigkeit
$I$	$\text{A}$	elektr. Strom
$L$	$\text{W}\Omega/\text{K}^2$	Lorenz-Zahl
$l$	$\text{m}$	Länge
$l_0$	$\text{m}$	Ursprungslänge eines Körpers
$l_{0,\text{ges}}$	$\text{m}$	Ursprungslänge aller betrachteter Körper
$l_{0,A}$	$\text{m}$	Ursprungslänge des Körpers aus Material A

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$l_1$	m	neue Länge eines Körpers
$l_A$	m	Länge des Körpers aus Material A
$l_{ges}$	m	Länge aller betrachteter Körper
$m$	kg	Masse eines Körpers
$\dot{m}$	kg/s	Massenstrom
$n$		Anzahl
$n_B$		Brechungsindex
$P_1$		Punkt 1
$P_h$	W	Heizleistung
$P_{max}$	W	Maximale Leistung
$P_{TEG}$	W	vom TEG generierte Leistung
$\dot{Q}$	W	Wärmestrom
$\dot{Q}_\alpha$	W	Wärmestrom aufgrund von Konvektion
$\dot{Q}_{in}$	W	Wärmestrom, der einem System zugeführt wird
$\dot{Q}_{Joule}$	W	Joule'sche Verlustwärme
$\dot{Q}_k$	W	Wärmestrom, der in das Kühlwasser übertragen wird
$\dot{Q}_\lambda$	W	Wärmestrom aufgrund von Wärmeleitung
$\dot{Q}_{Peltier}$	W	Wärmestrom aufgrund des Peltier-Effekts
$\dot{Q}_S$	W	Wärmestrom aufgrund von Strahlung
$\dot{Q}_S^{A_1 A_2}$	W	Wärmestrom aufgrund von Strahlung von Fläche $A_1$ zu Fläche $A_2$
$\dot{Q}_{S_h}$	W	Strahlungsverluste der heißen Seite
$\dot{Q}_{S_k}$	W	Strahlungsverluste der kalten Seite
$\dot{Q}_{Thomson}$	W	Wärmestrom aufgrund des Thomson-Effekts
$R$	$\Omega$	elektrischer Widerstand
$S$	V/K	Seebeck-Koeffizient
$S_A$	V/K	Seebeck-Koeffizient des Materials A (absoluter Wert)
$S_{AB}$	V/K	Seebeck-Koeffizient der Materialien A und B (relativer Wert)
$T$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur
$T_0$	$^{\circ}\text{C}$	Anfangstemperatur
$T_A$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur der Fläche A
$T_h$	$^{\circ}\text{C}$	Temperatur der heißen Seite
$T_{h,Ab}$	$^{\circ}\text{C}$	Abgastemperatur
$T_{h,ICEV}$	$^{\circ}\text{C}$	Abgastemperatur des Verbrennungsmotors
$T_{h,NEFZ}$	$^{\circ}\text{C}$	Abgastemperatur während des NEFZ

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$T_{h,PHEV}$	°C	Abgastemperatur des Plugin-Hybrids
$T_k$	°C	Temperatur der kalten Seite
$T_{k,ICEV}$	°C	Kühlkreislauf­temperatur des Verbrennungsmotors
$T_{k,Kühl}$	°C	Kühlkreislauf­temperatur
$T_{k,NEFZ}$	°C	Kühlkreislauf­temperatur während des NEFZ
$T_{k,PHEV}$	°C	Kühlkreislauf­temperatur des Plugin-Hybrids
$T_{k,WT_{aus}}$	°C	Austritts­temperatur des Wärmetauschers
$T_{k,WT_{ein}}$	°C	Eintritts­temperatur des Wärmetauschers
$\bar{T}$	°C	mittlere Temperatur
$T_O$	°C	Temperatur der Wärme übertragenden Oberfläche
$T_{P_1}$	°C	Temperatur an Punkt $P_1$
$T_\infty$	°C	Temperatur der Umgebung
$t$	s	Zeit
$t_1$	s	Zeitpunkt 1
$U$	V	Spannung
$U_{AB}$	V	Thermospannung der Materialien A und B
$U_{ges}$	V	Gesamtspannung
$U_{ref}$	V	Referenzspannung
$\dot{V}$	m <sup>3</sup> /h	Volumenstrom
$ZT$		Güte der thermoelektrischen Wandlung
$\vec{x}$		Ortsvektor eines Punktes
$x_{ist}$		Istwert der Größe x
$x_{soll}$		Sollwert der Größe x

Griechische Buchstaben:

$\alpha$	W/(m <sup>2</sup> K)	Wärmeübergangskoeffizient
$\alpha_A$	W/(m <sup>2</sup> K)	Wärmeübergangskoeffizient von Material A
$\Delta$		Differenz zwischen zwei Werten
$\epsilon$		Dehnung
$\epsilon_{A,x}$		Dehnung des Materials A in x-Richtung
$\epsilon_E$		Emissionsgrad
$\epsilon_{E,A_1}$		Emissionsgrad der Fläche $A_1$
$\epsilon_{mech}$		Dehnung eines Körpers unter mechanischem Einfluss

Formelzeichen	Einheit	Bedeutung
$\epsilon_{therm}$		Dehnung eines Körpers unter thermischem Einfluss
$\eta$		Systemwirkungsgrad
$\eta_h$		Wirkungsgrad, Berechnung über heiße Seite
$\eta_k$		Wirkungsgrad, Berechnung über kalte Seite
$\eta_{TEG}$		Wirkungsgrad eines TEG
$\Lambda$	m	mittlere freie Weglänge
$\lambda$	W/(m K)	Wärmeleitfähigkeit
$\lambda_w$	nm	Wellenlänge
$\nu_A$		Poissonzahl des Materials A
$\Pi$	V	Peltier-Koeffizient
$\Pi_A$	V	Peltier-Koeffizient des Materials A
$\Pi_{AB}$	V	Peltier-Koeffizient der Materialien A und B
$\varphi_{A_{12}}$		Einstrahlzahl der Flächen $A_1$ und $A_2$
$\rho$	kg/m <sup>3</sup>	Dichte
$\sigma$	N/m <sup>2</sup>	Spannung
$\sigma_{A,x}$	N/m <sup>2</sup>	Spannung in Material A in x-Richtung
$\sigma_{el}$	S/m	elektrische Leitfähigkeit
$\sigma_S^{A_{12}}$	W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )	Strahlungskonstante einer Anordnung von zwei Flächen $A_1$ und $A_2$
$\sigma_{St}$	W/(m <sup>2</sup> K <sup>4</sup> )	Stefan-Boltzmann-Konstante ( $5,67 \times 10^{-8} \text{ W/(m}^2\text{K}^4)$ )
$\tau$	V/K	Thomson-Koeffizient



---

## Motivation und Aufbau der Arbeit

---

Thermoelektrische Generatoren (TEG) ermöglichen es aus ungenutzter Wärme elektrische Energie zu gewinnen. Gerade vor dem Hintergrund von Ressourcenknappheit müssen Wege gefunden werden die verfügbare Energie bestmöglich einzusetzen. TEG werden daher für verschiedene Einsatzzwecke diskutiert. Als ein mögliches Einsatzgebiet ist die Automobiltechnik zu nennen. Dieses Kapitel fasst einleitend die Motivation zur Entstehung der vorliegenden Arbeit zusammen. Neben dieser tragen verschiedene Untersuchungen, die bereits zu ähnlichen Themen verfasst wurden, zur Entstehung der Arbeit bei und setzen sie in deren Kontext. Zum Schluss der Einleitung werden kurz die Ziele und der Aufbau der durchgeführten Analysen dargestellt, um einen guten Einstieg in die Thematik zu finden.

### 1.1 Motivation

Neben der Entwicklung hochautomatisierter Kraftfahrzeuge (Kfz) ist die Optimierung des Energieverbrauchs im Kfz das dominierende Thema der Automobilindustrie der vergangenen Jahre. Für diesen seit längerem zu beobachtenden Trend gibt es zwei große Treiber. Für die Nutzung des Kfz, welches einen wichtigen Träger des

Ressourcen-  
knappheit

Individualverkehrs darstellt, ist zunächst einmal die Entwicklung des Kraftstoffpreises ausschlaggebend. Die auch in der Öffentlichkeit breit diskutierte Ressourcenknappheit und die damit verbundenen Preise für Energieträger haben daher einen entscheidenden Einfluss auf die Entwicklung neuer Fahrzeuggenerationen. Der Bedarf an Erdöl und im Vergleich dazu dessen Förderung sowie Neufunde entwickeln sich in entgegengesetzte Richtungen. Abbildung 1.1 zeigt, dass Schätzungen zufolge die Ölförderung in den kommenden Jahren auf rund 20 Mrd. Barrel pro Jahr sinken wird. Der Bedarf hingegen wird auf gut das Doppelte ansteigen. Auf lange Sicht ist daher mit einem weiteren Anstieg der Kraftstoffkosten zu rechnen.

Geändertes Um-  
weltbewusstsein

Darüber hinaus ist gerade durch ein geändertes Umweltbewusstsein der Menschen und die Präsenz dieses Themas in den Medien, die Notwendigkeit einer nachhaltigen CO<sub>2</sub>-Reduktion in das öffentliche Bewusstsein gedrungen und stellt den zweiten Treiber dar. Die damit einhergehende Energiewende und auch Themen wie die Elektromobilität führen zu einem Umdenken bei der Neuanschaffung eines Fahrzeugs. Der Wunsch nach immer effizienteren und insbesondere umweltfreundlichen Kfz hat insgesamt einen deutlichen Bedeutungsgewinn erfahren. Für die Kraftfahrzeugindustrie haben die Verbrauchswerte und die Emissionen des CO<sub>2</sub>-Äquivalents damit eine entscheidende Rolle eingenommen. Von regulatorischer Seite wird dieser Trend durch verschärfte CO<sub>2</sub>-Richtlinien weiter verstärkt. Eine Prognose von TREMOD gibt für das Jahr 2020 CO<sub>2</sub>-Emissionen in Höhe von 152,3 Mt alleine durch den Straßenverkehr an [1]. Die Vorgaben des Gesetzgebers und der Wunsch des Kunden umweltfreundliche und nachhaltige Technologien zu kaufen und zu nutzen, führen somit seit Jahren zu gewaltigen Anstrengungen diesem gerecht zu werden. [2], [3] und [4]

Gestiegene  
Anforderungen

Der Umstieg auf öffentliche Verkehrsmittel würde gesamtgesellschaftlich sicherlich teilweise Abhilfe schaffen. Dem steht allerdings der Wunsch nach individueller Mobilität gegenüber. Zusätzlich sind die Anforderungen an heutige Kfz im Bereich des Komforts und der Fahrerassistenz immer weiter gestiegen. Dies hat zur Folge, dass insgesamt im Kfz eine erhebliche und stetig wachsende Energiemenge für sogenannte Nebenverbraucher benötigt wird. Um insgesamt dennoch eine Effizienzsteigerung erreichen zu können, gilt es Technologien zu entwickeln, die Fahrleistung und Fahrspaß mit Wirtschaftlichkeit und Umweltverträglichkeit verbinden.

## Verbrauch senken

Um die gesetzlichen Vorgaben, ebenso wie den Wunsch der Kunden zu erfüllen, müssen verschiedenste Maßnahmen im Kfz umgesetzt werden. Diese zielen zum Einen darauf, die eingesetzte Energie zum Fahrzeugantrieb zu senken. Zu nennen ist hier sicherlich das Bestreben nach Leichtbau oder die Optimierung der Aerodynamik und Systeme wie die Start-Stopp-Automatik [5]. Zum Anderen werden verstärkt neue Systeme entwickelt, die die eingesetzte Energie optimal nutzen sollen. In diesem Zusammenhang wird oft von der sogenannten Rekuperation, also

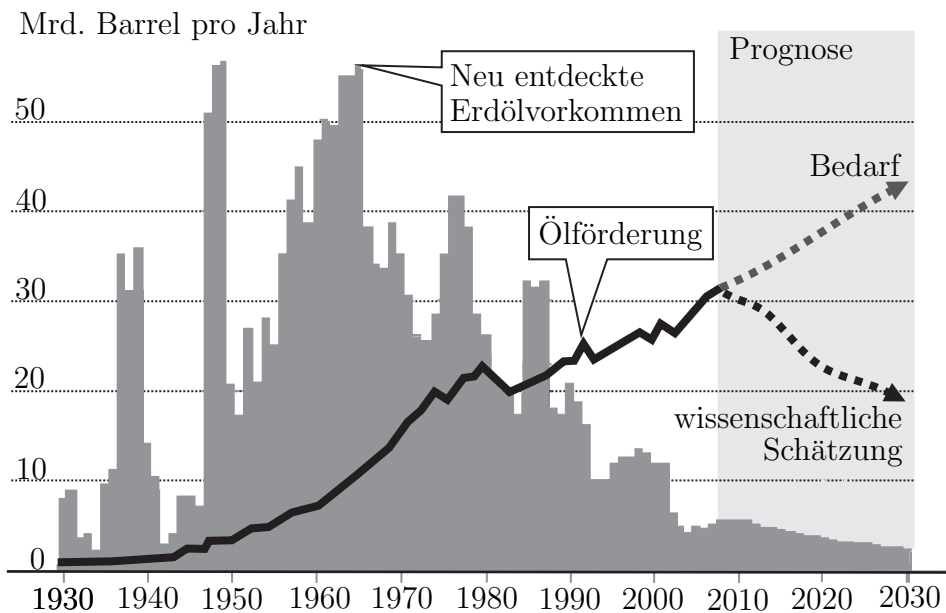


Abbildung 1.1: Weltweite Ölfunde und Ölförderung; in Anlehnung an [7]

der Wiedergewinnung von eingesetzter Energie zur weiteren Nutzung im Kfz, gesprochen. Das wohl bekannteste Beispiel ist die Bremsenergierückgewinnung bei elektrisch betriebenen Kraftfahrzeugen. Hierzu wird der Elektromotor, der das Kfz gewöhnlich antreibt, als Generator betrieben [6]. Bei Betätigung des Bremspedals wird das Kfz über die mechanische Leistungsaufnahme des Generators verzögert.

Ebenso wie die Nutzung der Bewegungsenergie, werden auch zunehmend Techniken erforscht und eingesetzt, die die Verlustenergie im Kfz nutzbar machen sollen. Hier ist insbesondere die Abgaswärmenutzung eine vieldiskutierte Möglichkeit. In [8] wird detailliert aufgeschlüsselt, wie sich die Energie im Kraftstoff beim Verbrennungsprozess aufteilt und es wird deutlich, dass etwa ein Drittel dieser Energie ungenutzt als Abwärme über den Auspuff abgeführt wird. Dieser hohe Anteil verdeutlicht, dass die gezielte Nutzung dieser Energie einen großen Hebel bei der Effizienzsteigerung darstellt. Hier greifen unterschiedliche Konzepte, um die scheinbar verlorene Energie zurück zu gewinnen. Eine Technik ist der Einsatz sogenannter thermoelektrischer Generatoren (TEG). Diese wandeln thermische Energie direkt in elektrische Energie um. Unverzichtbar ist dabei das Vorhandensein einer Temperaturdifferenz. Als Treiber für die Wandlung können im Kraftfahrzeug die Abgaswärme und der Kühlmittelstrom genutzt werden. Dieser Ansatz zur Entwicklung eines hochtemperaturtauglichen thermoelektrischen Generators mit dem Ziel einer Industrialisierung wurde im Projekt EcoTEG verfolgt, in dem verschiedene Industrie- und Forschungspartner neuartige Materialien untersuchten, auf ihre Tauglichkeit für den Einsatz in Kraftfahrzeugen prüften und ein Konzept zur Industrialisierung entwickelten [9].

Potential Abgas

## 1.2 Einordnung in den wissenschaftlichen Kontext

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist die Analyse des thermomechanischen Verhaltens von thermoelektrischen Generatoren im Kfz. Ein thermoelektrischer Generator ist in der Lage thermische Energie ohne bewegliche Teile direkt in elektrische Energie umzuwandeln. Hierzu wird eine vorhandene Temperaturdifferenz genutzt, welche die Quelle des zugrunde liegenden Seebeck-Effekts darstellt. Die verschiedenen Einsatzmöglichkeiten für TEG ergeben sich aus unterschiedlichen Belastungen mit teilweise sehr großen Temperaturdifferenzen, die einen TEG stressen können.

Aktueller  
Wirkungsgrad

Derzeit werden thermoelektrische Generatoren zur Charakterisierung der vorrangig elektrischen, thermischen und thermoelektrischen Eigenschaften mit gleichmäßigen Temperatur- oder Wärmestromschritten beaufschlagt und vermessen und die reale Belastung vernachlässigt. Ziel ist dabei die Tauglichkeit der Materialauswahl und der gewählten Anbindungstechnik<sup>1</sup> sowie den resultierenden Wirkungsgrad der thermoelektrischen Wandlung zu messen und/oder zu überprüfen. Aktuell wird der Wirkungsgrad mit rund 6 bis 10 % wie in [10] und [11] angegeben; bei besonders hohen Temperaturdifferenzen bis zu 15 % [12].

Materialforschung

Viele Veröffentlichungen befassen sich mit dieser Charakterisierung und verfolgen das Ziel ein neues thermoelektrisches Halbleitermaterial, dessen elektrische Kontaktierung oder den Wirkungsgrad zu präsentieren. Die Autoren in [13] beispielsweise dotieren Skutterudit, ein Material, das sich besonders für den Hochtemperaturbereich eignet, mit Barium und Yttrium, um über die Streuung der Phononen die Wärmeleitfähigkeit zu senken und die thermoelektrische Gütezahl  $ZT$  zu erhöhen (Details zu den Materialentwicklungen folgen in Abschnitt 2.4.4). Durch diese Änderung kann ein  $ZT$  von 1,35 bei 530 °C erreicht werden. Ähnliche Forschungsarbeiten präsentieren die Autoren in den Veröffentlichungen [14] und [15].

Thermoelektrik  
im Kfz

Da die Materialforschung nicht im Fokus der vorliegenden Arbeit steht, nimmt auch die Charakterisierung der elektrischen und thermoelektrischen Eigenschaften nur eine Nebenrolle ein. Der Schwerpunkt der Arbeit liegt auf der Untersuchung des TEG unter realistischen Einsatzbedingungen. Im Speziellen geht es dabei um eine thermisch dynamische Belastung, wie sie im realen Einsatz auftritt. Da der Einbau von TEG in den Abgasstrang von Kraftfahrzeugen derzeit viel diskutiert wird (siehe [16], [17] oder [18]), stellt das Kfz die zu untersuchende Anwendung

<sup>1</sup>Unter dem Begriff Anbindungstechnik werden die Verbindung der unterschiedlichen Modulbausteine (Halbleiter, elektrische Kontakte, Isolierung) untereinander und die Anbindung an die Wärmequelle und -senke zusammengefasst.

dar. Auch in diesem Bereich konzentriert sich die große Anzahl von Veröffentlichungen aktuell auf den Nachweis eines hohen Wirkungsgrades bzw. der daraus resultierenden Energiemenge (siehe hierzu [19]). Weiterhin betrachtet der Autor in [20] die Einflüsse des TEG auf das Kfz, da beispielsweise das Zusatzgewicht der TEG und die Änderung des Abgasgegendrucks negative Auswirkungen auf die Gesamteffizienz des Kraftfahrzeugs haben können.

Abgrenzend hierzu stellt die vorliegende Arbeit die thermomechanische Eignung in den Vordergrund und behandelt die Effizienz der Energiewandlung nur zweitrangig. Primär wird untersucht, ob ein TEG den Belastungen im Abgasstrang standhält. Hierzu werden keine festen Temperaturstufen gleichen Abstands vorgegeben, sondern die wechselnde Belastung einer realen Fahrt als Basis für die Untersuchungen gewählt. Ein Grund dafür ist, dass für die eingesetzten Materialien und deren Verbindung untereinander meist nicht die Höhe der thermischen Belastung das Versagenskriterium ist, sondern die Häufigkeit dieser Höchstbelastung. So kann eine Abschätzung der Dauerfestigkeit über die Anzahl der überstandenen Lastwechsel angegeben werden. Zwar sind bereits Anstrengungen bekannt, die Verformung und die auftretenden Spannungen in einem TEG zu bestimmen, diese konzentrieren sich jedoch erneut auf einige wenige feste Temperaturschritte und besitzen wenig Bezug zu realen Anwendungen (vgl. [21] und [22]). Alternativ wird in [23] betrachtet, inwiefern die Verformung nicht die Lebensdauer, sondern den Wirkungsgrad und die Leistung durch die Alterung der TEG beeinflusst. Auch diese Untersuchungen sind notwendig, ermöglichen jedoch keine ganzheitliche Betrachtung.

Thermo-  
mechanische  
Eignung

Untersuchung  
der Belastung

Die Autoren in [24] legen das Augenmerk auf eine angepasste Materialauswahl und analysieren die thermischen und mechanischen Auswirkungen auf das gewählte Material bei festen Temperaturschritten mit Temperaturen bis 650 °C. Weiterhin werden in [25] reine Materialanalysen bezüglich der Festigkeit durchgeführt und der Einfluss der Materialzusammensetzung auf die mechanischen Eigenschaften bei Raumtemperatur untersucht. Die Autoren in [26], [27] und [28] gehen einen Schritt weiter und simulieren die Funktionalität und das thermomechanische Verhalten extrudierter TEG und segmentierter Schenkel im Niedertemperaturbereich und passen die Geometrie, basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen, an.

Bisherige thermo-  
mechanische  
Analysen

Die Kombination aus der Analyse der Verformung bei gleichzeitiger Belastung mit einem realistischen Temperaturprofil einer Autofahrt, wie sie in dieser Arbeit durchgeführt wird, stellt somit den entscheidenden und bisher nicht betrachteten Schritt hin zu einer ganzheitlichen Untersuchung eines TEG dar. Die eingesetzten Messtechniken ermöglichen so die Bewertung einer denkbaren Anwendung unter elektrischer, thermoelektrischer und thermomechanischer Sicht. Diese umfassende Betrachtung erfordert eine interdisziplinäre Arbeitsweise und die Berücksichtigung

Realistische  
Belastung

der Bereiche Thermoelektrik, Thermomechanik, Mess- und Regelungstechnik sowie FEM- und Numeriksimulationen dynamischen Systemverhaltens.

## 1.3 Ziele und Aufbau

Stand der  
Technik

Die Arbeit ist inhaltlich in vier Teile untergliedert. Im ersten Teil wird der Stand der Technik vermittelt. Es wird zunächst aus fahrzeugseitiger Sicht zusammengefasst, welche Entwicklungen es zur Abgaswärmenutzung gibt. Die gängigen Konzepte werden vorgestellt und kurz beschrieben. Weiterhin wird das Thema „Thermoelektrik“ umfassend betrachtet. Die physikalischen Grundlagen der thermoelektrischen Effekte und deren Ursache werden erläutert; ebenso wie der Aufbau von thermoelektrischen Generatoren und die Bedeutung der Materialauswahl. Zum späteren Verständnis der thermischen Vorgänge und Verluste im TEG/System, werden die grundlegenden Themen der thermischen Ankopplung von TEG und ihre Bedeutung für die innere Wärmeübertragung und Funktionseigenschaften beschrieben. Die Einführung in die Thematik endet mit aktuellen Anwendungsmöglichkeiten thermoelektrischer Generatoren. Im Anschluss werden die Grundlagen der Thermomechanik beschrieben, um auch hier die notwendigen Zusammenhänge zu erläutern.

Messtechnik und  
Lastprofile

Im zweiten Teil erfolgt eine detaillierte Betrachtung der Messtechnik. Es werden verfügbare Messtechniken zur funktionellen Charakterisierung von TEG vorgestellt und messtechnische Problemstellungen erörtert. Im Anschluss wird die eingesetzte Mess- und Simulationstechnik beschrieben, die sich im Aufbau wiederum in drei Teilbereiche gliedert:

- prototypischer Messaufbau,
- Electronic Speckle Pattern Interferometer und
- FEM<sup>2</sup>-Simulation.

Die Randbedingungen der eingesetzten FEM-Simulation zum thermomechanischen Verhalten des TEG werden ebenfalls genauer betrachtet. Neben der verwendeten Hardware zur Bestimmung funktioneller TEG-Eigenschaften, werden spezifische Anpassungen des gesamten Messsystems durchgeführt, um die Messung der Probenverformung zu ermöglichen. Im regelungstechnischen Zusammenhang stehend, spielen die verwendeten thermischen Lastprofile, die für die Messungen eingesetzt werden, eine große Rolle. Deren Herleitung aus Realdaten über verschiedene Modelle findet ebenso Beachtung, wie der Ablauf einer Messung.

---

<sup>2</sup>Finite-Elemente-Methode

Der dritte Teil umfasst die Auswertung der durchgeführten Messungen. Beispielformhaft werden repräsentative Ergebnisse herausgegriffen und erläutert. Diese umfassen in erster Linie Resultate der thermomechanischen Analyse verschiedener Lastprofile. Ergänzt werden sie durch Ergebnisse simultan durchgeführter, funktio-neller Messungen. Insgesamt werden die mit Hilfe unterschiedlicher Analysearten generierten Messdaten ausgewertet und gegenübergestellt.

Ergebnis-  
präsentation

Im vierten und letzten Teil der Arbeit werden Möglichkeiten aufgezeigt, wie TEG unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse durch ein angepasstes TEG-Design wirkungsvoller eingesetzt werden können. Ebenso finden verschiedene alter-native Anwendungsbereiche in einer kurzen Analyse Berücksichtigung. Die Arbeit schließt mit einem umfassenden Fazit zu den Themen

Schluss-  
folgerungen

- auftretende Verformungen des TEG im Kfz,
- Problemstellungen des TEG-Einsatzes vor dem Hintergrund hier durchge-führter Messungen/Ergebnisse,
- technologische Möglichkeiten, diesen zu begegnen,
- Vergleich: prognostizierte TEG-Performance & Performance im Zyklus und
- Potential von TEG im Kfz aus thermomechanischer Sicht.





## KAPITEL 2

---

# Stand der Technik

---

Der Seebeck-Effekt bietet eine Möglichkeit, ungenutzte Abgaswärme im Kfz zurückzugewinnen und elektrisch nutzbar zu machen. Damit stellt er potentiell eine Methode zur Effizienzsteigerung des Kraftfahrzeugs als Gesamtsystem dar. Zur Einleitung in die Thematik werden aktuelle Konzepte zur thermischen Rekuperation kurz umrissen. Der Einsatz thermoelektrischer Generatoren als eine Alternative wird diesen gegenübergestellt. Darüber hinaus werden die Grundlagen der Thermoelektrik genauer beleuchtet. Abschließend erfolgt eine Kurzdarstellung der für die Arbeit relevanten thermomechanischen Grundlagen.

## 2.1 Thermische Rekuperation im Kfz

Unter Berücksichtigung dessen, dass ein Großteil der im Verbrennungsmotor freigesetzten Energie als Abwärme ungenutzt über den Auspuff in die Umgebung strömt, wird das Anliegen, diese Energie nutzbar zu machen, nachvollziehbar. Abbildung 2.1 zeigt die Verteilung der im Kraftstoff enthaltenen Energie und macht deutlich, dass bei einem typischen Verbrennungsmotor rund ein Drittel der zugeführten Kraftstoffenergie tatsächlich in die Bewegung des Kfz fließt [8] [29]. Die

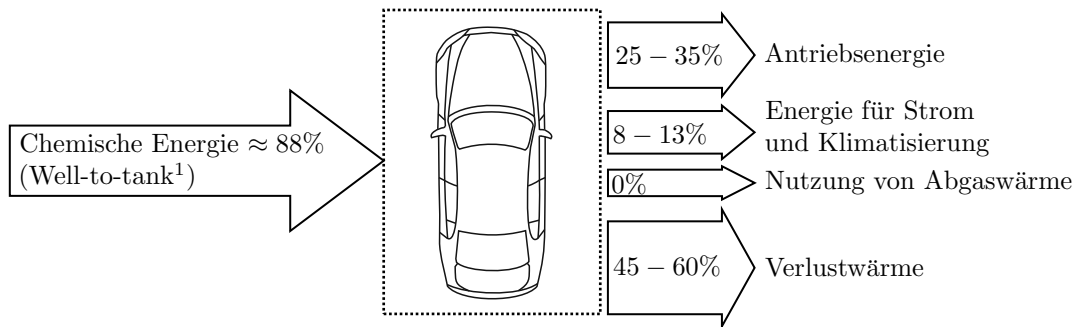


Abbildung 2.1: Typische Verteilung der im Dieselkraftstoff enthaltenen Energie eines Verbrennungsmotors, in Anlehnung an [29]

Verlustreiche  
Verbrennung

Verluste, wie Strahlungsverluste des Brennraums oder Verluste durch nicht ideale Verbrennung, können nicht sinnvoll genutzt werden, um den Gesamtwirkungsgrad zu verbessern. Da der zugrundeliegende Verbrennungsprozess nicht wesentlich effizienter gestaltet werden kann, müssen diese Verluste akzeptiert werden. Dennoch muss diskutiert werden, inwieweit die ungewollte Wärme, die über das Abgas abgeführt wird, genutzt werden kann, sodass der Gesamtwirkungsgrad positiv beeinflusst wird. Diese Abgaswärme könnte zurückgewonnen und an anderer Stelle eingesetzt werden. Aus rein thermischer Sicht bieten sich für verschiedene Anwendungen unterschiedliche Positionen im Abgasstrang an. Abbildung 2.2 stellt die maximalen Temperaturbereiche im Abgasstrang dar. Im Bereich des Motors sind Maximaltemperaturen von bis zu  $650^{\circ}\text{C}$  zu erwarten. Im mittlere Bereich des Abgasstrangs werden Temperaturen bis  $450^{\circ}\text{C}$  und im Bereich des Endschalldämpfers und des Auspuffs Temperaturen bis  $200^{\circ}\text{C}$  gemessen. Die genannten Temperaturen sind abhängig von der gefahrenen Geschwindigkeit und dem Fahrzeugtyp und wurden aus [20] entnommen.

Thermo-  
management

Zur optimalen Nutzung der vorhandenen thermischen Energie ist ein Thermomanagement notwendig. Der Begriff Thermomanagement bezeichnet allgemein die genaue Steuerung der thermischen Energieströme, mit dem Ziel die Emissionswerte und den Kraftstoffverbrauch zu reduzieren und den Innenraumkomfort sowie die Lebensdauer verschiedener Komponenten zu erhöhen [30]. Hierzu wird thermische Energie bei Bedarf von einer Komponente zu einer anderen übertragen und bestmöglich genutzt. Die Optimierung des Wärmehaushalts stellt eine komplexe Aufgabe dar und umfasst unter anderem die Abgaswärme. Die Rückgewinnung dieser thermischen Energie aus dem Abgas, auch thermische Rekuperation genannt, ist damit ein Teilbereich des Thermomanagements mit dem primären Ziel den Gesamtwirkungsgrad des Kraftfahrzeugs zu steigern. Hierzu wird die Wärmeenergie,

<sup>1</sup>Well-to-tank beschreibt eine Berechnungsweise zur Ermittlung der Emissionen. Es werden alle Faktoren von der Primärenergieförderung bis hin zur Kraftstoffbereitstellung im Tank berücksichtigt.

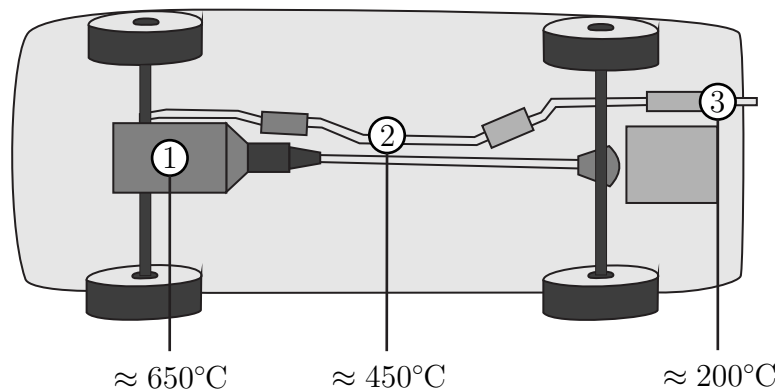


Abbildung 2.2: Maximaltemperaturen nach [20] im Abgasstrang während einer Überlandfahrt, in Anlehnung an [31]

die ungenutzt über das Abgas an die Umgebung abgegeben würde, zurückgewonnen und auf verschiedene Arten genutzt. Nachfolgend werden Konzepte beleuchtet, welche die Abgaswärme direkt nutzen, speichern oder in elektrische oder mechanische Energie umwandeln, um die Effizienz von Kfz zu erhöhen.

Eine Option der Abgaswärmenutzung sind TEG (auch thermoelektrische Module genannt), die mit besonderer Ausführlichkeit betrachtet werden. Weiterhin werden die Abgasrückführung, verschiedene Speichermöglichkeiten und die Integration einer Gasturbine diskutiert. Alle genannten Systeme weisen die Gemeinsamkeit auf, dass bei dem Einbau von Komponenten zur Abgaswärmenutzung systemrelevante Vorgaben beachtet werden müssen, um solche Techniken in den Abgasstrang zu integrieren. Speziell bei der Integration von thermoelektrischen Generatoren müssen Herausforderungen, wie die thermische Anbindung an die Wärmequelle und -senke, die leistungselektronische Integration in das Bordnetz, die Änderung des Abgasgegendruck und das zusätzliche Gewicht berücksichtigt werden [9]. Hierbei muss sichergestellt sein, dass die positiven Aspekte der zusätzlichen Komponenten und Anpassungen ihre unvermeidbaren negativen Einflüsse (Zusatzgewicht etc.) übersteigen und eine positive Bilanz ergeben.

Herausforderung  
System-  
integration

## 2.2 Bekannte Konzepte zur Abgaswärmenutzung

Um eine kurze Übersicht über den aktuellen Stand der Technik im Bereich der Abgaswärmenutzung zu geben, werden folgende Konzepte betrachtet:

- Abgaswärmenutzung zur Innenraumklimatisierung,

- Abgaswärmenutzung zur Kaltstartverkürzung und
- Abgaswärmenutzung zur Wandlung in andere Energieformen.

Direkte und  
indirekte Abgas-  
wärmenutzung

Die Aufzählung erhebt nicht den Anspruch auf Vollständigkeit, umfasst aber die gängigen Konzepte. Bei den verschiedenen Konzepten kann zwischen der direkten und der indirekten Nutzung der im Abgas enthaltenen, thermischen Energie unterschieden werden. Bei der Innenraumklimatisierung und der Kaltstartverkürzung erfolgt eine direkte Nutzung, wohingegen die indirekte Nutzung eine Umwandlung in mechanische oder elektrische Energie vorsieht. Die Abgasnutzung mittels Turbolader, welche die potentielle und kinetische Energie des Abgases nutzt, um die Ansaugung der Frischluft zu verbessern, findet in dieser Arbeit keine Berücksichtigung. Details zu der genannten Technik können unter anderem in [32] nachgelesen werden.

### 2.2.1 Abgaswärmenutzung zur Innenraumklimatisierung

Mit Abgas heizen

Bei der Innenraumklimatisierung wird ein Teil der thermischen Energie, die im Abgas enthalten ist, zur Aufheizung des Innenraums genutzt. Das Konzept stammt aus Zeiten hoher thermischer Verluste im Brennraum; damals enthielt das Kühlwasser soviel Abwärme vom Motor, dass der Innenraum mit der thermischen Energie gewärmt werden konnte. Das Motorkühlwasser heutiger, verbrauchsoptimierter Kfz enthält meist nicht mehr ausreichend thermische Energie, um die Innenraumklimatisierung vollständig abzudecken. Aktuelle Kfz benötigen häufig einen Zuheizer, um auch bei niedrigen Umgebungstemperaturen ein angenehmes Innenraumklima zu erzeugen. An dieser Stelle kann eine Rückführung des Abgases eingesetzt werden, um mit der darin enthaltenen thermischen Energie den Innenraum zu klimatisieren. Dies kann dazu führen, dass die Zuheizer kleiner dimensioniert oder ganz eingespart werden können [33].

Abwärmespeicher

Weiterhin besteht die Möglichkeit Abwärme zu speichern und bei Bedarf zur Verfügung zu stellen. In [34] beschreibt der Autor hierzu verschiedene Möglichkeiten. Die dort genannten (thermo-)chemischen und Latentwärmespeicher können dazu eingesetzt werden, Wärme während des Betriebs des Kraftfahrzeugs über die Stillstandszeit hinweg zu speichern, um dann den Innenraum bei einem Kaltstart schneller zu erwärmen. Bei thermochemischen Speichern wird durch eine endotherme Reaktion Wärme in einem Feststoff gespeichert. Dies geschieht zum Beispiel bei Trocknungsvorgängen, bei denen durch Desorption Wasser aus einem Granulat abgespalten wird. Die zur Desorption benötigte thermische Energie wird während der

Fahrt aus dem Kühlwasser gewonnen<sup>2</sup>. Beim nächsten Kaltstart wird das Wasser in einer exothermen Reaktion durch Adsorption wieder an das Granulat gebunden. [35] Die so freigesetzte Energie steht dann zur Innenraumklimatisierung zur Verfügung.

Ein Latentwärmespeicher, welcher sich die Eigenschaften eines Phasenwechselmaterials (phase change materials, PCM) zunutze macht, ist ebenfalls in der Lage thermische Energie über die Dauer der Stillstandszeit eines Kfz zu speichern und zum Zeitpunkt des Kaltstarts wieder zur Verfügung zu stellen. Bei dieser Technik dienen Stoffe mit niedriger Schmelztemperatur als Speichermaterial: sie werden bei relativ niedrigen Temperaturen verflüssigt und speichern die Schmelzwärme beim Phasenwechsel von fest zu flüssig. Sobald die thermische Energie benötigt wird, erfolgt die Freigabe derselben beim Erstarren des Materials. Die so freigesetzte Energie kann ebenfalls genutzt werden, um den Fahrgastraum schneller zu erwärmen. [34]

PCM

### 2.2.2 Abgaswärmenutzung zur Kaltstartverkürzung

Eine klare Trennung zwischen der Nutzungsmöglichkeit der Innenraumklimatisierung und der nachfolgend beschriebenen Kaltstartverkürzung ist nicht ganz einfach, da viele Techniken in beiden Bereichen Anwendung finden. Die Kaltstartverkürzung hat zum Ziel, Komponenten nach längeren Stillstandszeiten zu erwärmen und so die Phase mit hohem Kraftstoffverbrauch zu verkürzen. Nach längerem Stillstand sind Komponenten, Kühlmittel oder auch das Motoröl abgekühlt und müssen für einen effizienten Betrieb erst vorgewärmt werden. Hierzu können ebenfalls die bereits erwähnten Speichermedien eingesetzt werden, um das Kühlwasser oder den Katalysator zu erwärmen und dadurch eine Absenkung der Emissionen und durch die schnellere Aufwärmung die Einsparung von Kraftstoff herbeizuführen [36].

Speichersysteme  
zur Kaltstartver-  
kürzung

Eine weitere Technologie stellt die Abgasrückführung (AGR) dar. Bei diesem etablierten System zur Abgasnutzung steht nicht die Nutzung der im Abgas enthaltenen thermischen Energie im Vordergrund, sondern die Beeinflussung der chemischen Reaktion bei der Verbrennung. Bei der AGR wird ein Teil des Abgases der Frischluft zugeführt und diese Mischung in die Brennkammer geleitet. Die Beimischung des Abgases senkt die Sauerstoffkonzentration im Brennraum und führt zu einer Absenkung der Verbrennungstemperatur. Während der Verbrennung hängt die Stickoxidbildung exponentiell von dieser Temperatur ab. Auf diese Weise kann Einfluss auf die Emissionen genommen werden: geringere Temperaturen führen zu

Kaltstart-  
verkürzung  
mittels AGR

<sup>2</sup>Das Kühlwasser nimmt thermische Energie vom Motorblock auf. Streng genommen wird an dieser Stelle nicht die Abgaswärme, sondern die direkte Motorabwärme genutzt

einer Reduktion der Stickoxide im Abgas und zu einer Möglichkeit die Emissionsgrenzwerte der Europäischen Union einzuhalten<sup>3</sup>. Eine zusätzliche Kühlung des Abgases vor der Beimischung verstärkt diesen Effekt und gehört mittlerweile zu den gängigen Maßnahmen [37].

#### AGR-Varianten

Bei dem Konzept der Abgasrückführung wird zwischen der internen und externen Rückführung und bei letzterer weiterhin zwischen einer Hochdruck- (HD-AGR) und einer Niederdruck-Abgasrückführung (ND-AGR) unterschieden. Die interne AGR ist auf den Einsatz in Ottomotoren beschränkt und wird über das zeitweise Öffnen des Auslassventils des Brennraums während des Ansaugtakts realisiert. Eine externe Rückführung erfolgt über zusätzliche Leitungen aus dem Abgasstrang. Die Nieder- und Hochdruckvarianten unterscheiden sich durch den Einbauort des AGR-Ventils, welches den Zustrom des Abgases zur Frischluft regelt, und damit einhergehend durch den Zeitpunkt und das Druckniveau der Rückführung. Die Autoren von [38] beschreiben ausführlich die Vor- und Nachteile beider Konzepte. Wie bereits erwähnt, handelt es sich bei der AGR nicht in erster Linie um ein Konzept um die thermische Energie des Abgases zu nutzen; dennoch hat die Rückführung desselben den Nebeneffekt, dass sich der Motor anfangs schneller erwärmt und die Kaltstartphase somit verkürzt wird.

### 2.2.3 Abgaswärmenutzung zur Wandlung in andere Energieformen

#### Umwandlung mittels Thermoelektrik

Das zentrale Thema der Arbeit ist die Umwandlung der Abgaswärme in elektrische Energie mittels thermoelektrischer Generatoren. Bei dieser Art der Wandlung werden mehrere TEG mittels Wärmetauscher jeweils mit einer Seite an den Abgasstrang und mit der anderen Seite an eine Wärmesenke gekoppelt. Im Kfz kann die Abfuhr der thermischen Energie über den Fahrzeugkühlkreislauf oder die Umgebungsluft realisiert werden. Über den thermoelektrischen Effekt wird thermische Energie des Abgases bei entsprechend hoher Temperaturdifferenz zum Kühlkreislauf in nutzbare elektrische Energie umgewandelt und kann somit zur Unterstützung des Bordnetzes eingesetzt werden. Die Nutzung ist somit nicht auf den Einsatz im Bereich des Thermomanagements beschränkt.

#### Anforderungen an TEG

Um einen TEG massenmarkttauglich zu machen, muss er verschiedenen Anforderungen genügen. Beispielsweise müssen die Kosten in einem angemessenen Verhältnis zum Nutzen der Anwendung stehen. Der Wirkungsgrad von TEG und

<sup>3</sup>Bei einem Dieselmotor müssen zusätzlich die Partikelemissionen berücksichtigt werden. Da die Rußpartikelbildung bei sinkenden Verbrennungstemperaturen zunimmt, muss ein Mittelweg zwischen der Reduzierung dieser Partikelbildung und der Bildung von Stickoxiden gefunden werden

den kompletten Systemen zur Abgasnutzung ist derzeit noch relativ gering und erfordert den Einsatz günstiger Materialien, um dies zu kompensieren. Die Materialien müssen außerdem ungiftig und einfach zu entsorgen sein, um die Akzeptanz der Kunden zu erlangen und den geltenden Regularien zu entsprechen. Derzeitige Forschungsanstrengungen konzentrieren sich besonders auf die Materialentwicklung; neue und verbesserte Materialkonzepte steigern den ehemals äußerst geringen Wirkungsgrad und eröffnen neue Möglichkeiten für ein breiteres Anwendungsspektrum [39], [40], [41] und [42].

Weiterhin stellt die Aufbau- und Verbindungstechnik eine Herausforderung bei der Suche nach denkbaren Einsatzmöglichkeiten eines TEG dar. Welche Materialien zueinander passen und mit welchen Fertigungsverfahren die einzelnen Komponenten eines TEG aneinandergefügt werden, ist je nach Anwendung unterschiedlich. Speziell für den Einsatz im Kfz bedeutet das: die Verbindungstechnik darf die Komponenten während des Fügens nicht zerstören und muss bei Temperaturen über 500 °C noch stabil sein, um im Kfz eingesetzt werden zu können.

Herausforderung  
Verbindungstechnik

Ein nicht zu vernachlässigender Punkt und der Fokus dieser Arbeit ist allerdings die mechanische Belastung während des Betriebs und die damit einhergehende Beeinflussung der Lebensdauer. Die zeitgleiche Anbindung an eine Wärmequelle und -senke führt zu Zug-, Druck- und Scherkräften im TEG und kann diesen beschädigen. Weiterhin wird das Modul zusätzlich durch den inhomogenen Temperaturverlauf im Material belastet. Verschärft wird diese Problematik durch den dynamischen Betrieb eines Kraftfahrzeugs und die daraus folgenden wechselnden Temperaturen im Abgasstrang. Jeder Brems- und Beschleunigungsvorgang führt zur Variation der Abgastemperatur, welche sich direkt auf den thermoelektrischen Generator auswirkt. Die genaue Kenntnis der Belastungssituation und deren Folgen und Auswirkungen auf den TEG sowie die Beachtung der impliziten Herausforderungen auf Materialseite sind somit von großer Bedeutung für einen effizienten und ausfallsicheren TEG-Betrieb. Konstante, nur leicht schwankende Temperaturen oder hoch dynamische Profile beeinflussen den Prozesswirkungsgrad, das Materialverhalten und nicht zuletzt die Lebensdauer und somit die Eignung eines Moduls für die jeweilige Anwendung. Wenn die zuvor genannten Anforderungen berücksichtigt werden, ist die Integration von thermoelektrischen Generatoren möglich und stellt eine Option dar, um den Betrieb eines Kfz effizienter zu gestalten.

Thermomechanische  
Herausforderungen

Dennoch erfordert die Integration von thermoelektrischen Generatoren in Kfz den Einbau weiterer Komponenten, die verschiedenste Aufgaben übernehmen und damit die Realisierung der Technologie ermöglichen. Ohne diese mit in die Betrachtung der Effizienz zu integrieren, kann keine verlässliche Aussage über die Eignung des TEG im Abgasstrang getroffen werden. Die verschiedenen Komponenten und deren Verbindungen sind in Abbildung 2.3 dargestellt. Zur thermischen Anbindung

Komponenten  
und deren  
Einfluss

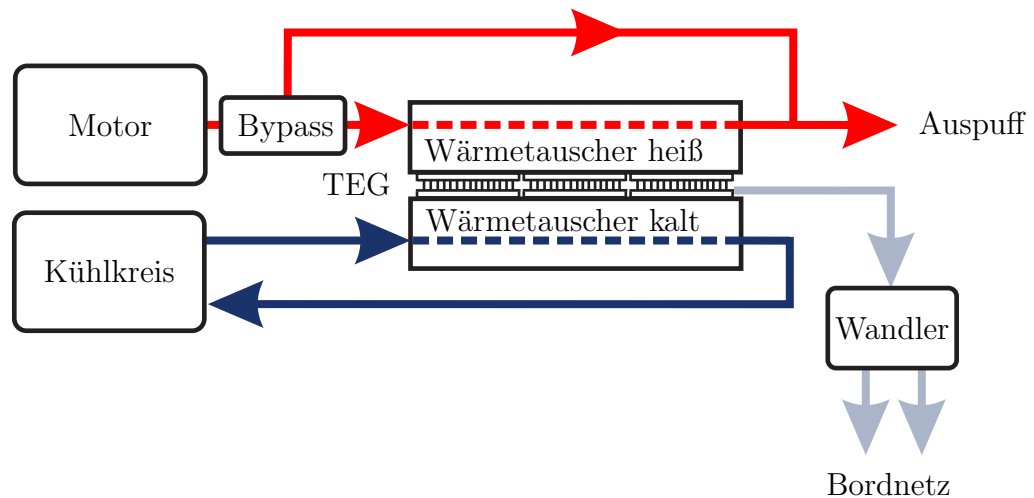


Abbildung 2.3: Benötigte Komponenten für den TEG-Einsatz im Kfz

wird ein Wärmetauscher benötigt, welcher die Abgaswärme in den TEG leitet und ein weiterer zur Wärmeabfuhr ins Kühlwasser (je nach Bauraum ist ein kombinierter Wärmetauscher für Wärmequelle und -senke sinnvoll). Weiterhin muss je nach Temperaturbeständigkeit der thermoelektrischen Materialien eine Bypassführung berücksichtigt werden. Im Hochlastbetrieb kann so ein Teil des Abgasmassenstroms an den TEG vorbeigeführt werden und schützt die Module vor einer Überhitzung und möglicher Beschädigung. Nachteilig wirkt sich hier aus, dass die Bypassklappe ihrerseits Bauraum benötigt, Zusatzmasse einbringt und regelungstechnisch bzw. elektrisch zu integrieren ist. Zur Anbindung an das elektrische Bordnetz des Kfz wird weiterhin der Einbau eines DC/DC-Wandler notwendig. Auf diese Weise wird sichergestellt, dass die generierte Spannung an die Bordnetzspannung angepasst und bestmöglich genutzt werden kann. Darüber hinaus werden mehrere thermoelektrische Generatoren benötigt, um die maximal mögliche thermische Energie umzuwandeln. Die Anzahl ist in erster Linie vom verfügbaren Bauraum und weiterhin vom tolerierbaren Zusatzgewicht und dem Wirkungsgrad abhängig. Ebenso müssen der Einfluss auf den Abgasgegendruck, das Zusatzgewicht aller Komponenten und der erhöhte Leistungsbedarf der Kühlmittelpumpe berücksichtigt werden.

Eine weitere Möglichkeit die Energie des Abgases nutzbar zu machen, ist die Umwandlung von Wärme in Arbeit mittels eines Kreisprozesses. Ein Kreisprozess beschreibt allgemein eine zyklische Zustandsänderung eines Systems. Dazu zählen unter anderem Verbrennungsmotoren, Gasturbinen oder Wärmepumpen. Die nachfolgend beschriebene Technik stellt ebenfalls einen Kreisprozess dar, der die Abgaswärme nutzbar macht.



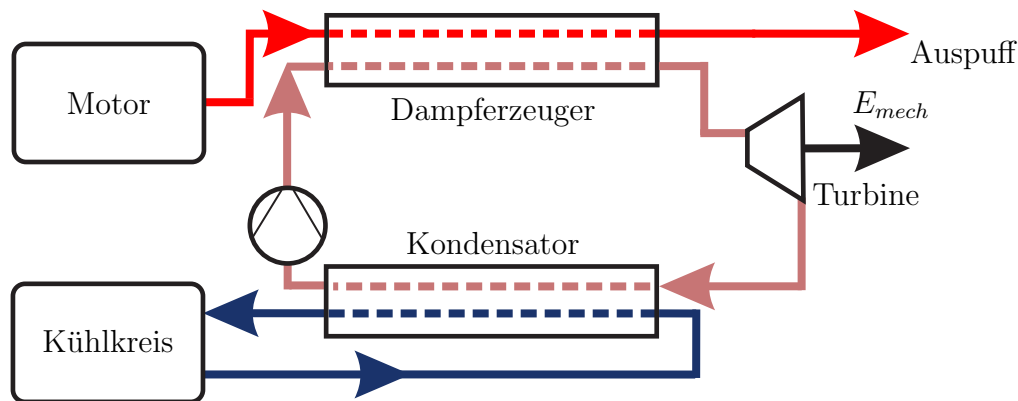


Abbildung 2.4: Vereinfachte Darstellung des Organic-Rankine-Cycle

Der Einsatz eines Organic-Rankine-Cycle (ORC) ermöglicht die Rekuperation der im Abgas gespeicherten thermischen Energie durch eine Umwandlung in mechanische Energie. Hierzu wird ein Arbeitsmedium mittels einer Pumpe in einen Wärmetauscher gefördert (vgl. Abbildung 2.4). Dieser Wärmetauscher überträgt die thermische Energie des Abgases auf das Arbeitsmedium und verdampft es. Im weiteren Verlauf gelangt der Dampf in einen Expander, wo er eine Turbine antreibt und somit die thermische Energie zunächst in mechanische Energie umgewandelt wird. Später ist eine direkte Kopplung an den Antriebsstrang oder eine Entlastung des Bordnetzes durch die Wandlung der mechanischen in elektrische Energie möglich. Im Anschluss an die Expansion des Mediums folgt erneut ein Phasenwechsel. Nach der Kondensation des Arbeitsmediums in einem zweiten Wärmetauscher, wird das Fluid zurück zur Pumpe geführt und schließt damit den Kreislauf. Im Kondensator wird die Phasenwechselenergie in den Kühlkreislauf des Kraftfahrzeugs abgegeben und macht eine zusätzliche Kühlung im ORC überflüssig.

Umwandlung  
mittels Rankine

Der Wirkungsgrad der Wandlung und die generierte Leistung hängen bei diesem Konzept sehr stark von der Fahrdynamik ab. Je nach Fahrzyklus ergeben sich andere Wärmequellen- und Kühlmittelströme und verhindern den konstanten Betrieb der Turbine. Weitere Herausforderungen, wie die richtige Wahl des Kühlmediums, die Kompensation des Zusatzgewichts oder der Mehrkostenaufwand, gilt es bei der Integration zu berücksichtigen. Diese Herausforderungen gleichen denen bei der TEG-Integration, jedoch mit erhöhter Systemkomplexität und dem Nachteil verschleißender beweglicher Teile. Dennoch konnten in Testzyklen bereits Einsparungen von 10% (Diesel) und 12% (Benzin) mit dem ORC erzielt werden [43].

Hürden der  
Technologie

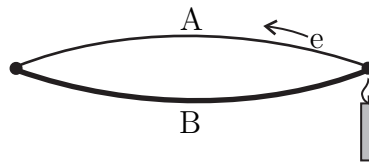


Abbildung 2.5: Die einfachste Form des Seebeck-Effekts

## 2.3 Thermoelektrische Effekte

### Definition Thermoelektrik

Das Gebiet der Thermoelektrik (auch Thermoelektrizität) beschreibt die Wechselwirkung zwischen thermodynamischen und elektrischen Größen. Maßgebliche Abläufe in thermoelektrisch aktiven Materialien sind die beiderseitige Beeinflussung der Größen Wärme und elektrische Energie, sowie die Umwandlung einer Energieform in die jeweils andere. Sämtliche Vorgänge in elektrischen Leitern, bei denen eine Temperaturdifferenz zu einem elektrischen Strom oder ein elektrischer Strom zu einer Temperaturdifferenz führt, lassen sich unter dem Begriff der Thermoelektrik zusammenfassen. Durch diese Effekte bewirkte energetische Umwandlungen sind umkehrbar, sodass sowohl ein strominduzierter Wärmetransport, als auch ein wärmeinduzierter bzw. temperaturinduzierter Ladungstransport möglich ist. [44]

Die Thermoelektrik umfasst drei grundlegende Effekte, die jeweils nach ihren Entdeckern benannt sind:

- Seebeck-Effekt,
- Peltier-Effekt und
- Thomson-Effekt.

Weiterhin gibt es drei Arten thermomagnetischer Wechselwirkungen, die im Bereich der Thermoelektrik eine untergeordnete Rolle spielen. Sie beschreiben die Einflussnahme eines magnetischen Feldes auf einen stromdurchflossenen Leiter oder auf einen im Leiter vorhandenen Temperaturgradienten. [45] Diese Kombination aus Thermoelektrik und Magnetismus wird hier nicht weiter betrachtet.

### 2.3.1 Der Seebeck-Effekt

Der Seebeck-Effekt kann an einer Leiterschleife, wie sie in Abbildung 2.5 dargestellt ist, beobachtet werden. Die Leiterschleife besteht aus zwei miteinander verbundenen, zunächst stromlosen Leitern unterschiedlichen Materials A und B. Sobald eine Verbindungsstelle zwischen den beiden Leitern mit einer extern zugeführten Energie erwärmt wird, kann ein Stromfluss durch die Schleife gemessen werden. Dieser

### Entstehung der Seebeck- Spannung

sogenannte Thermoström entsteht durch die Temperaturdifferenz zwischen der erwärmten Verbindungsstelle und der thermisch konstanten Verbindungsstelle. Die Auftrennung der Leiterschleife zwischen den beiden Verbindungsstellen ermöglicht die Messung einer elektrischen Potentialdifferenz. Diese auftretende Thermo- oder Seebeck-Spannung ist direkt proportional zur Temperaturdifferenz

$$U = S\Delta T. \quad (2.1)$$

$U$	Spannung
$S$	Seebeck-Koeffizient
$\Delta T$	Temperaturdifferenz zwischen den beiden Verbindungsstellen

Der Proportionalitätsfaktor  $S$  zwischen Spannung und Temperaturdifferenz wird (relativer) Seebeck-Koeffizient genannt. Hierbei handelt es sich um eine materialabhängige Größe. Es wird unterschieden zwischen dem relativen Seebeck-Koeffizienten, der für eine Materialpaarung steht und dem absoluten Wert, der ein einzelnes Material beschreibt. In den folgenden Kapiteln wird stets der relative Seebeck-Koeffizient verwendet, wenn nicht explizit auf die Verwendung des absoluten Seebeck-Koeffizienten hingewiesen wird. Jedes Material weist folglich einen eigenen, temperaturabhängigen Seebeck-Koeffizienten, auch Thermokraft genannt, auf. Diese Abhängigkeit wird aufgrund des geringen Einflusses im Verlauf des Kapitels nicht weiter berücksichtigt. [45]

Seebeck-Koeffizient

Um eine möglichst große Seebeck-Spannung erzeugen zu können, muss nach Gleichung 2.1 eine entsprechend große Temperaturdifferenz vorliegen. Weiterhin muss eine Materialpaarung gewählt werden, deren Seebeck-Koeffizienten weit auseinander liegen und/oder ein unterschiedliches Vorzeichen aufweisen und demnach von Elektronen- oder Löcherleitung dominiert sind. Unter Berücksichtigung zweier Materialien ändert sich die Gleichung 2.1 für die Materialien A und B wie folgt:

Absoluter und relativer Seebeck-Koeffizient

$$U_{AB} = (S_A - S_B)\Delta T, \quad (2.2)$$

mit

$$(S_A - S_B) = S_{AB}. \quad (2.3)$$

$U_{AB}$	Thermospannung der Materialien A und B
$S_A$	Seebeck-Koeffizient des Materials A (absoluter Wert)
$S_B$	Seebeck-Koeffizient des Materials B (absoluter Wert)
$S_{AB}$	Seebeck-Koeffizient der Materialien A und B (relativer Wert)
$\Delta T$	Temperaturdifferenz zwischen den beiden Verbindungsstellen

Somit ergibt sich der relative Seebeck-Koeffizient für ein Materialpaar aus der Differenz der absoluten Seebeck-Koeffizienten der beiden Materialien. Eine für einen TEG vorteilhafte Paarung besteht somit aus zwei Materialien, deren Seebeck-Koeffizienten eine große Differenz aufweisen. Zur Ermittlung des Seebeck-Koeffizienten und somit auch zur Auswahl einer passenden Materialpaarung kann eine thermoelektrischen Spannungsreihe (exemplarisch in Tabelle 2.1 abgebildet) herangezogen werden.

Seebeck-Koeffizient	in mV/K
Tellur	50
Silizium	44,80
Wismut	-7,7bis -5,2
Antimon	4,6 bis 4,86
Konstantan	-3,47 bis -3,04
Kobalt	-1,99 bis -1,52
Nickel	-1,94 bis -1,2
Eisen	1,87 bis 1,89
Molybdän	1,16 bis 1,31
Kadmium	0,85 bis 0,92
Wolfram	0,65 bis 0,9
Manganin	0,57 bis 0,82
Gold	0,56 bis 0,8
Silber	0,67 bis 0,79
Zink	0,6 bis 0,79
Kupfer	0,72 bis 0,77
Iridium	0,65 bis 0,68
Tantal	0,34 bis 0,51
Blei	0,41 bis 0,46
Zinn	0,4 bis 0,44
Magnesium	0,4 bis 0,43
Aluminium	0,37 bis 0,41
Kohle	0,25 bis 0,3
Quecksilber	-0,07 bis 0,04
Platin	$\pm 0$

Tabelle 2.1: Thermoelektrische Spannungsreihe ( $\Delta T = 100^\circ\text{C}$ ) mit Werten nach [46]

### 2.3.2 Die Ursache des Seebeck-Effekts

Die Ursache für den entstehenden Thermostrom basiert auf verschiedenen, korrelierenden Vorgängen, die nachfolgend beschrieben werden. Aufgrund der Komplexität der realen Vorgänge, wird zur Beschreibung ein vereinfachtes Modell verwendet. Die entscheidenden Effekte können aber dadurch ausreichend genau und anschaulich erläutert werden. Die Erwärmung einer der beiden Kontaktstellen der Leitschleife führt zur erhöhten Ladungsträrgeschwindigkeit (in diesem Fall der Elektronen). An der kälteren Kontaktstelle bleibt diese Geschwindigkeitszunahme aufgrund der fehlenden Erwärmung aus. Abhängig von der zugeführten Energie ergibt sich folglich eine Geschwindigkeit der Ladungsträger. Dieser Sachverhalt ist in Abbildung 2.6 vereinfacht an einem Schenkelpaar dargestellt. Die Ladungsträger im oberen Schenkelbereich, der an die warme Keramik ( $T_h$ ) angrenzt, bewegen sich schnell, was durch die längeren Pfeile dargestellt wird. Die Ladungsträger im unteren Bereich, der mit der kalten Keramik ( $T_k$ ) in Kontakt ist, bewegen sind hingegen langsamer. Trotz möglicher Stöße untereinander und dadurch ausgelöster Streuung summieren sich die Bewegungen zu einer Absolutbewegung der Ladungsträger in Richtung des Gebiets niedriger Temperatur. So entsteht eine Umverteilung der Ladungsträger im Leiter. Diese Bewegung wird als Thermodiffusionsstrom bezeichnet, der sich entgegen dem Temperaturgradienten ausrichtet. Durch den Anstieg der frei beweglichen Ladungsträger im Bereich niedrigerer Temperatur, entsteht ein elektrisches Feld zwischen der heißen und der kalten Seite. Bei geöffneter Leitschleife bringt dieses elektrische Feld, das dem Thermodiffusionsstrom entgegen wirkt, diesen zum Erliegen. Bei geschlossener Leitschleife hingegen entsteht ein nutzbarer elektrischer Strom, der einen angeschlossenen Verbraucher (vgl. techn. Stromrichtung in Abbildung 2.6) durchströmen würde.

Thermodiffusion

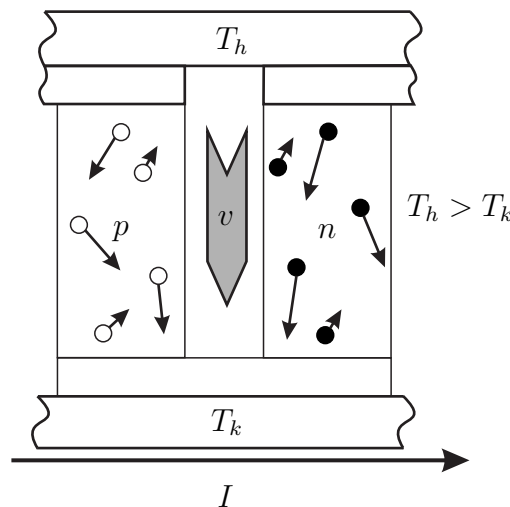


Abbildung 2.6: Vorgänge bei der Thermodiffusion

### 2.3.3 Der Peltier-Effekt

Umkehrung des  
Seebeck-Effekts

Der zweite thermoelektrische Effekt ist der Peltier-Effekt. Dieser kann zumindest phänomenologisch als Umkehrung des Seebeck-Effekts verstanden werden. Die Belastung einer Leiterschleife, bestehend aus zwei Materialien, mit einem elektrischen Strom, führt zur Ausbildung einer Temperaturdifferenz an den Verbindungsstellen zwischen den beiden Materialien. Die Ursache des Peltier-Effekts kann vereinfacht mit dem Elektronengasmodell beschrieben werden: der angelegte Strom führt dazu, dass sich Elektronen unterschiedlicher Energie wie ein Gas durch den Leiter bewegen [47]. Beim Materialdurchgang nehmen die Elektronen entweder Energie von Gitter auf und kühlen es somit ab oder geben einen Teil der eigenen Energie ab und erwärmen das Gitter dadurch [48]. Auf diese Weise ändert sich die Temperatur der beiden Kontaktstellen zwischen den Materialien und führt zur Ausbildung einer Temperaturdifferenz. Diese wird somit durch die Bewegung von Ladungsträgern und folglich durch eine Änderung der inneren Energie erzeugt. Zur Beschreibung der umgesetzten Energie an den Verbindungsstellen wird die nachfolgende Formel verwendet

$$\dot{Q}_{Peltier} = \Pi_{AB} I, \quad (2.4)$$

mit

$$\Pi_{AB} = \Pi_A - \Pi_B. \quad (2.5)$$

$\dot{Q}_{Peltier}$	Wärmestrom, aufgrund des Peltier-Effekts
$\Pi_{AB}$	Peltier-Koeffizient der Materialien A und B
$I$	elektr. Strom

Ähnlich wie beim Seebeck-Effekt ist der Proportionalitätsfaktor, hier  $\Pi_{AB}$  (Peltier-Koeffizient), eine materialabhängige Größe. Durch eine gezielte Wahl der Materialpaarung kann Einfluss auf die generierte Temperaturdifferenz genommen werden. Je nach Richtung des Strom  $I$  ändert sich das Vorzeichen von  $\dot{Q}_{Peltier}$  und beschreibt, ob an der Verbindungsstelle Wärme aufgenommen oder abgegeben wird.

Im Zusammenhang mit dem Peltier-Effekt wird kurz auf das Joule'sche Gesetz eingegangen, um Verwechslungen vorzubeugen und die beiden Effekte klar zu tren-

nen. Ein deutlicher Unterschied besteht darin, dass der Peltier-Effekt umkehrbar ist. Im Gegensatz hierzu handelt es sich bei der Joule'schen Wärme

Joule'sches  
Gesetz

$$\dot{Q}_{Joule} = RI^2 \quad (2.6)$$

$\dot{Q}_{Joule}$  joule'sche Verlustwärme  
 $R$  elektrischer Widerstand

um irreversible Verlustwärme. Diese sogenannten joule'schen oder ohm'schen Verluste entstehen durch Streuprozesse der fließenden Ladungsträger beim Durchströmen eines Leiters und führen nur zu einer Erwärmung des Leiters und nicht, wie im Falle des Peltier-Effekts, zu einer Erwärmung auf der einen und einer Abkühlung auf der anderen Seite des Leiters. Trotz der unterschiedlichen Ursachen für beide Effekte, treten sie simultan an den Verbindungsstellen auf und die ohm'schen Verluste führen aufgrund ihrer quadratischen Abhängigkeit vom Stromfluss zu einer Dezimierung der Temperaturdifferenz. Da die häufigste Anwendung sogenannter Peltier-Elemente Kühlanwendungen sind, wirkt sich die Erwärmung der kalten Verbindungsstelle nachteilig auf die Elemente und deren Anwendung aus.

### 2.3.4 Der Thomson-Effekt

Der Vollständigkeit halber wird an dieser Stelle ebenfalls der dritte der thermoelektrischen Effekte erwähnt, welcher nach seinem Entdecker William Thomson benannt ist. Beim Thomson-Effekt handelt es sich um die Erwärmung oder Abkühlung eines homogenen Leiters, welcher von Strom durchflossen wird und einen Temperaturgradienten aufweist. Erneut ist dieser Effekt von der joule'schen Erwärmung eines Leiters durch seinen Widerstand zu unterscheiden. Abhängig von der Stromrichtung und dem verwendeten Material erfolgt eine Erwärmung oder Abkühlung des Leiters bedingt durch den Thomson-Effekt entsprechend der nachfolgenden Gesetzmäßigkeit

Effekt im  
homogenen  
Leiter

$$\dot{Q}_{Thomson} = -\tau I \Delta T. \quad (2.7)$$

$\dot{Q}_{Thomson}$  Wärmestrom, aufgrund des Thomson-Effekts  
 $\tau$  Thomson-Koeffizient

Der Temperaturunterschied tritt an dieser Stelle nicht zwischen den Materialien A und B auf, wie es zuvor der Fall war, sondern liegt zwischen zwei Punkten in einem Material vor. Je nach Stromstärke und Temperaturdifferenz, führt die Größe des materialabhängigen Thomson-Koeffizienten  $\tau$  zu einer mehr oder weniger messbaren Änderung der Temperatur. Diese Temperaturänderung wird jedoch von der reinen irreversiblen Erwärmung des Leiters durch die joule'sche Verlustwärme überlagert. Je nach Material und Stromrichtung addieren oder subtrahieren sich die beiden Effekte. Diese zeitgleiche Änderung durch die joule'schen Verluste erschwert eine Messung des Thomson-Effekts. Weiterhin hat dieser Effekt bisher keine technische Relevanz.

Effekte nicht  
trennbar

Grundsätzlich treten die thermoelektrischen Effekte immer in Kombination auf und beeinflussen sich gegenseitig. Eine inhomogene Leiterschleife, die von Strom durchflossen wird, bildet durch den Peltier-Effekt an den Materialübergängen ein Temperaturgefälle aus. Dieses Temperaturgefälle führt zum Seebeck-Effekt und generiert einen Strom. Generell führt ein Stromfluss in einem homogenen Leiter zu einer Erwärmung auf Basis des joule'schen Gesetzes. Zuletzt führt die Kombination dieser Effekte (Stromfluss und Temperaturdifferenz) zum Thomson-Effekt. Somit wird deutlich, dass eine Trennung der thermoelektrischen Vorgänge unmöglich und bei einer Anwendung die Kenntnis aller Effekte von Vorteil ist. Zusätzlich sei im Zusammenhang mit dem Seebeck-Effekt und seiner Nutzung in TEG erwähnt, dass sowohl der Peltier- als auch der Seebeck-Effekt innerhalb eines stromdurchflossenen TEG gleichzeitig wirken. Im generatorischen Betriebskennfeld eines TEG führt der Peltier-Effekt somit bei konstanten Temperaturen der Wärmequelle und -senke immer zu einer Absenkung der effektiv am Halbleitermaterial anliegenden Temperaturdifferenz.

Die Verbindungen der thermoelektrischen Vorgänge werden durch die Kelvin-Beziehungen beschrieben. Die Formeln

$$\Pi_A = S_A T \quad (2.8)$$

Kelvin-  
Beziehungen

und

$$\tau_{AB} = T \frac{S_{AB}}{\Delta T} \quad (2.9)$$



$\tau_{AB}$	Thomson-Koeffizient
$\Pi_A$	Peltier-Koeffizient des Materials A
$S_A$	Seebeck-Koeffizient des Materials A (absoluter Wert)
$T$	Temperatur
$S_{AB}$	Seebeck-Koeffizient der Materialien A und B (relativer Wert)
$\Delta T$	Temperaturdifferenz

beschreiben den Zusammenhang zwischen dem Peltier- und dem Seebeck-Effekt sowie die Verknüpfung des Seebeck- und des Thomson-Effekts. Diese Beziehungen unterstreichen den Sachverhalt, dass die Vorgänge nicht voneinander zu trennen sind. [44]

Trotz des kombinierten Auftretens der thermoelektrischen Effekte unterscheiden sich die Anwendungen und zielen jeweils auf einen der Effekte ab. Die Generierung einer Thermospannung in Abhängigkeit von einer Temperaturdifferenz wird beispielsweise zur Messung von Temperaturen mittels Thermoelementen genutzt. Außerdem kann mit Hilfe von thermoelektrischen Generatoren aus ungenutzter Abwärme, unter gleichzeitiger Bereitstellung einer Wärmesenke, elektrische Energie erzeugt und genutzt werden. Diese Anwendung ist Gegenstand der vorliegenden Arbeit und bezieht sich auf die im Abgas enthaltene Abwärme eines Kfz. Die präzise Temperierung, die durch den Peltier-Effekt möglich ist, wird für Kühlanwendungen eingesetzt. Hier gibt es bereits Einsatzmöglichkeiten im Automobilsektor im Bereich der Innenraumklimatisierung, die der Autor von [49] ausführlich beschreibt. Lediglich für den Thomson-Effekt ist bisher keine technische Anwendung bekannt.

Anwendungen

## 2.4 Modulaufbau und Material

Der Modulaufbau und die Wahl geeigneter Materialien spielen bei der Entwicklung eines thermoelektrischen Generators eine zentrale Rolle. Der richtige Aufbau entscheidet über eine möglicherweise universelle Einsetzbarkeit. Die Materialeigenschaften müssen aufeinander abgestimmt sein, einen haltbaren Verbund ergeben und gleichzeitig thermische Energie günstig und effektiv in elektrische Energie wandeln. Die Abstimmung bezieht sich hierbei sowohl auf eine elektrische als auch auf eine thermische Anpassung des TEG-Aufbaus an die Applikation. Im Hinblick auf die Zielvorgabe der TEG-Ausgangsspannung und der zu erzielenden Leistungsdichte müssen isotherme Wärmeübergangsflächen an Wärmequelle und -senke ermöglicht und geeignete Verschaltungsstrategien entworfen werden<sup>4</sup>. Ferner sind die

Modulanpassung  
an das System

<sup>4</sup>Als problematisch stellt sich der parallele wie serielle Anschluss mehrerer TEG entlang eines asymmetrischen Temperaturverlaufs zwischen Heiß- und Kaltseite heraus.

thermischen Charakteristika der Anwendung von entscheidender Bedeutung. Eine maximale Effizienz des Wärmetransports gewährleistet einen maximalen thermodynamischen Wirkungsgrad (Carnot) durch höhere Temperaturdifferenzen am TEG. Eine Anpassung des Wärmeflusses durch den TEG muss ebenfalls erfolgen. Damit kommt dem inneren Modulaufbau eines TEG eine entscheidende Rolle zu. Die drei Hauptbestandteile eines TEG,

- thermoelektrische Halbleiter,
- metallische Brücken zur seriellen elektrischen Kontaktierung der Halbleiterelemente sowie
- elektrisch isolierende Deckplatten und gegebenenfalls Stützstrukturen zwischen den Halbleiterelementen

gilt es hier zu berücksichtigen und aufeinander abzustimmen.

### 2.4.1 Aufbau eines TEG

Thermoelek-  
trisches  
Material

Das thermoelektrisch aktive Material stellt in Form von sogenannten Schenkeln die innerste Komponente eines TEG dar. Als Materialpaarung können Metalle und Halbleiter mit großen Seebeck-Koeffizienten gewählt werden. Weiteres zur Materialauswahl wird im Verlauf dieses Abschnitts erläutert. Wie bereits aus Abschnitt 2.3.1 bekannt, werden an dieser Stelle zwei unterschiedliche Materialien miteinander verbunden und bilden ein sogenanntes Schenkelpaar.

Kontaktierung

Den Übergang zwischen diesen beiden Schenkeln, anfangs trivial als Verbindungsstelle bezeichnet, stellt die elektrische Kontaktierung dar. In Abbildung 2.7 ist zu erkennen, dass mehrere Schenkelpaare nebeneinander angeordnet sind. Durch die metallischen Brücken an den Stirnflächen werden alle Schenkel elektrisch in Reihe geschaltet.

Isolator

Nach Außen werden die Kontakte mit einer Keramik elektrisch isoliert, um Kurzschlüsse an den meist metallischen Wärmetauschern zu vermeiden, welche sich an beiden Seiten des TEG befinden. Durch die Zu-/Abfuhr der thermischen Energie über diese Keramikplatten, sind die mäanderförmig angeordneten Schenkel thermisch parallel geschaltet. Die keramischen Isolatoren sind mit der Wärmequelle und -senke verbunden und über sie wird die thermische Energie zu- bzw. abgeführt.

Im weiteren Verlauf dieser Arbeit werden die Ausdrücke „heiße Seite“ und „kalte Seite“ jeweils für die Seite des Moduls verwendet, die mit der Wärmequelle,

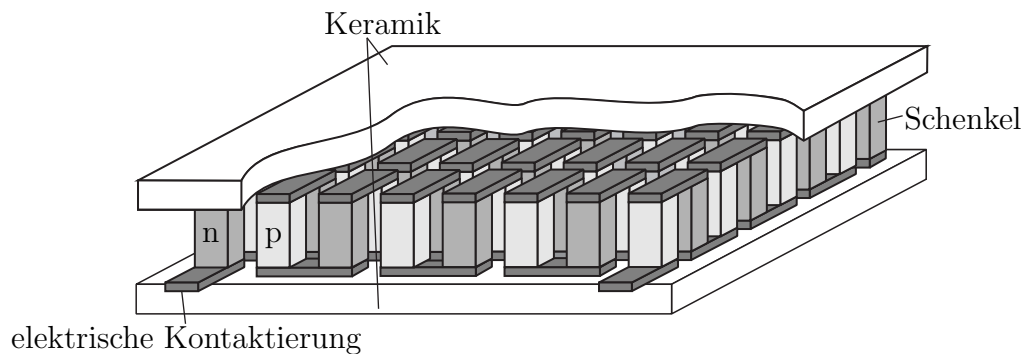


Abbildung 2.7: Aufbau eines Standard-TEG

bzw. der Wärmesenke verbunden ist. Über die heiße Seite wird zum Beispiel ungenutzte Abwärme zugeführt. Der benötigte Temperaturunterschied, um über den Seebeck-Effekt eine Thermospannung zu erzeugen, wird durch die Ankopplung der kalten Seite an eine Kühlung realisiert. Der Raum zwischen den keramischen Trägerplatten kann nach Außen mit Epoxydharz oder Silikonkautschuk abgeschlossen werden, um das Eindringen von Flüssigkeiten zu verhindern. Außerdem ist auch eine luftdichte Versiegelung und die Evakuierung des Innenraums möglich, um die ungewünschte (parasitäre) Wärmeübertragung über Konvektion an den Schenkel vorbei, zu verringern. In [50] wird die Bedeutung parasitärer Wärmeströme im TEG detailliert erläutert. Auf die Wärmeübertragung in den Zwischenräumen wird in Verbindung mit den Wärmetransportmechanismen nachfolgend noch genauer eingegangen.

Thermische Anbindung

Die Kantenlängen eines Moduls, sowie die Geometrie der Schenkel und der daraus resultierende Modulfüllgrad variieren je nach Hersteller und werden, auf die jeweilige Anwendung optimiert, ausgelegt. Bei der Wahl der Schenkelgeometrie können sowohl wirtschaftliche als auch funktionale Gesichtspunkte im Vordergrund einer Optimierung stehen. Das in Abbildung 2.7 gezeigte Modul stellt die gebräuchlichste Variante dar und wird in dieser Arbeit als Standardmodul bezeichnet. Hierbei können Abmessungen des TEG, wie die Kantenlänge und -dicke, variieren; das generelle Erscheinungsbild bleibt jedoch gleich.

Schenkelgeometrie

Je nach Anwendung sind auch alternative Konzepte des Modulaufbaus möglich. Einerseits kann die starre thermische Anbindung durch flexible Isolatoren oder durch eine Segmentierung<sup>5</sup> der Keramikplatten ersetzt werden. Durch diese Optimierung kann auf eine spezielle Anwendung eingegangen oder eine Reduktion

Moduldesign

<sup>5</sup>Die Segmentierung der Keramikplatte darf nicht verwechselt werden mit der Segmentierung der Schenkel. Diese Maßnahme kann ergriffen werden, um einen Schenkel in zwei Materialien aufzuteilen und somit die temperaturabhängigen Materialeigenschaften auf die unterschiedlichen Zustände der heißen und kalten Seite anzupassen.

der thermomechanischen Verspannungen, die ein Kernthema der vorliegenden Arbeit darstellen, herbeigeführt werden. Andererseits kann die gesamte Modul-/bzw. Schenkelgeometrie auf die Anwendung angepasst und beispielsweise, wie in [51] ringförmig ausgeführt werden.

## 2.4.2 Grundlagen des Wärmetransports

Bedeutung Wärmeübertragung

Zur Auslegung von thermoelektrischen Generatoren ist neben den Sachverhalten aus den vorangegangenen Abschnitten, die Kenntnis des thermischen Verhaltens von Bedeutung und relevant für eine effiziente Energiewandlung. Die einströmende Wärme der Quelle soll möglichst verlustfrei (geringe Wärmeübertragung an die Umgebung) und mit geringem Temperaturabfall über die Komponenten an das thermoelektrische Material geleitet werden. Auf diese Weise wird eine Maximierung der Temperaturdifferenz zur Kaltseite erreicht und eine möglichst hohe Leistungsabgabe realisiert. Um dies zu gewährleisten, ist ein guter thermischer Kontakt zwischen der Wärmequelle und der Keramikschiicht des TEG ausschlaggebend. Im Modul hingegen soll die thermische Energie möglichst schlecht geleitet werden und somit effektiver umzuwandeln sein. Eine hohe Wärmeleitfähigkeit würde die einströmende thermische Energie der Quelle zu schnell zur kalten Seite des TEG leiten und die Temperaturdifferenz reduzieren.

Um die thermischen Vorgänge in einem thermoelektrischen Generator richtig zu interpretieren, müssen die nachfolgenden Vorgänge berücksichtigt werden. Ausschlaggebend sind die verschiedenen Formen der Wärmeübertragung:

- Wärmeleitung,
- Konvektion und
- Wärmestrahlung.

Unter Kenntnis dieser Mechanismen kann der Wirkungsgrad der thermoelektrischen Energiewandlung durch ein abgestimmtes Design erhöht werden. Abhängig von der maßgeblichen Wärmetransportart einer Anwendung kann das Material mit Hilfe von zusätzlichen Atomen oder Gitterfehlern, die als Streuzentren fungieren, oder beispielsweise mit Hilfe von Übergittern verändert werden, um die thermischen Verluste zu reduzieren. Details hierzu finden sich im Abschnitt 2.4.4.

Definition  
Wärmeleitung

Die Wärmeleitung gehört zu den stoffgebundenen Wärmetransportmechanismen, welche in Festkörpern und untergeordnet auch in Flüssigkeiten und Gasen auftreten. Ausgelöst durch ein Temperaturgefälle, erfolgt ein Energietransport aufgrund

von atomaren und molekularen Wechselwirkungen [52]. Der entstehende Wärmestrom  $\dot{Q}_\lambda$  entgegen dem räumlichen Temperaturgradienten wird durch das Fouriersche Gesetz wie folgt beschrieben

$$\dot{Q}_\lambda = -\lambda A \text{grad}(T). \quad (2.10)$$

$\dot{Q}_\lambda$	Wärmestrom aufgrund von Wärmeleitung
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$A$	Fläche
$\text{grad}(T)$	räumlicher Temperaturgradient

Die Wärmeleitfähigkeit  $\lambda$  stellt hier den material- und richtungsabhängigen Proportionalitätsfaktor dar, welcher die Wärmeleitung maßgeblich beeinflusst. Gemäß dem 2. Hauptsatz der Thermodynamik verläuft der aus der Temperaturdifferenz entstehende Wärmestrom immer vom Bereich hoher Temperatur zum Bereich niedriger Temperatur.

Wärmeleitfähigkeit

Für die Thermoelektrik ist die Kenntnis der Wärmeleitfähigkeit eines Materials/Systems und der umliegenden Komponenten von großer Bedeutung. Der Wärmeübergang von der Wärmequelle zum TEG muss einen geringen thermischen Widerstand aufweisen und idealerweise mit einem Wärmeleitmittel (Folie, Paste) verbessert werden. Ein unzureichender Übergang mit offenen luftgefüllten Poren würde den direkten Wärmetransport ebenfalls verschlechtern. Im TEG selbst sollte die Wärmeleitung möglichst gering sein, um zu verhindern, dass die thermische Energie das Modul nahezu ungehindert passiert und die thermoelektrische Wandlung minimiert. Die Abführung der thermischen Energie an der Senke hingegen muss wieder optimal sein, um eine große Temperaturdifferenz zu gewährleisten.

Bedeutung für TEG

Der Wärmetransport über Konvektion beschreibt die Mitführung von Wärme in einem Fluid in Richtung abnehmender Temperatur. Dieser massegebundene Energietransport basiert auf makroskopischen Teilchenbewegungen und wird über das Newton'sche Abkühlungsgesetz

Konvektion

$$\dot{Q}_\alpha = \alpha A (T_O - T_\infty) \quad (2.11)$$

vereinfacht beschrieben. Neben dem Wärmetransport im Fluid wird auch der Wärmetransport zwischen einem Festkörper und einem Fluid (Wärmeübergang) und der Wärmetransport durch eine von zwei Fluiden umgebene Wand (Wärmedurchgang) unter dem Begriff Konvektion zusammengefasst. [52]

$\dot{Q}_\alpha$	Wärmestrom aufgrund von Konvektion
$\alpha$	Wärmeübergangskoeffizient
$T_O$	Temperatur der Wärme übertragenden Oberfläche
$T_\infty$	Temperatur der Umgebung

Freie/erzwungene  
Konvektion

Weiterhin kann zwischen freier und erzwungener Konvektion unterschieden werden. Das Aufsteigen von warmer Luft und im Gegenzug, das Absinken von kalter Luft, ist ein Beispiel für freie Konvektion. Allein der Dichteunterschied zwischen warmer und kalter Luft stellt hier die treibende Kraft dar; von außen wird nicht in das System eingegriffen. Hierbei sind das Strömungs- und das Temperaturfeld miteinander gekoppelt. Bei entkoppelten Feldern wird von erzwungener Konvektion gesprochen. Die Bewegung des Fluids wird durch eine externe Kraft, wie einen Druckgradienten, erzeugt. [52]

Bedeutung für  
TEG

Für die Thermoelektrik ist die Konvektion insofern von Bedeutung, als dass über den Luftspalt zwischen der heißen und der kalten Seite und zwischen den einzelnen Schenkeln thermische Energie übertragen wird. Hierbei handelt es sich um parasitäre (unerwünschte) Wärmeübertragung, welche den treibenden Temperaturgradienten reduziert, dem Konvertierungsprozess aber nicht zugeführt wird. Durch den Einfluss auf die energetische Gesamtbilanz wird der TEG-Wirkungsgrad direkt gesenkt. Aus diesem Grund werden thermoelektrische Module teilweise verkapselt und der Innenraum evakuiert, um einen konvektiven Wärmetransport zu verringern oder bestmöglich zu unterbinden. So wird die Effizienz der thermoelektrischen Wandlung nicht negativ beeinflusst. [50]

Wärmestrahlung

Der Wärmetransport über Strahlung muss im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Mechanismen nicht an einen Stoff gebunden sein. Die Übertragung von thermischer Strahlungsenergie findet über elektromagnetische Wellen statt, was so auch im Vakuum möglich ist. Ein weiterer Teil umfasst die Strahlung im Material, die häufig nicht einzeln berücksichtigt wird und von den Autoren in [53] theoretisch betrachtet wird. Der Formel für die Abstrahlung eines Körpers

$$\dot{Q}_S = \epsilon_E \sigma_{St} A T^4 \quad (2.12)$$

$\dot{Q}_S$	Wärmestrom aufgrund von Strahlung
$\epsilon_E$	Emissionsgrad
$\sigma_{St}$	Stefan-Boltzmann-Konstante
$A$	Fläche
$T$	Temperatur

kann entnommen werden, dass die emittierte thermische Energie von der abstrahlenden Fläche  $A$  und über den Emissionsgrad  $\epsilon_E$  von ihrer Beschaffenheit abhängt. Jeder Körper mit einer Temperatur  $T > 0\text{K}$  emittiert Wärme in einem von der Oberflächentemperatur abhängigen Wellenlängenbereich und absorbiert auch wieder einen Teil der Wärme, die von einer anderen Quelle ausgesandt wird und auf der Oberfläche auftrifft. Aus diesen Prozessen ergibt sich ein Nettowärmestrom. Somit ist die Betrachtung eines einzelnen Körpers zur Bilanzierung der Wärmeübertragung nicht ausreichend. Unter Berücksichtigung von zwei Körpern kann der Nettowärmestrom als

$$\dot{Q}_S^{A_{12}} = \sigma_S^{A_{12}} A_1 (T_{A_1}^4 - T_{A_2}^4) \quad (2.13)$$

$\dot{Q}_S^{A_{12}}$	Wärmestrom aufgrund von Strahlung zwischen $A_1$ und $A_2$
$\sigma_S^{A_{12}}$	Strahlungskonstante der Flächen $A_1$ und $A_2$
$A_1$	Fläche
$T_{A_1}$	Temperatur der Fläche $A_1$
$T_{A_2}$	Temperatur der Fläche $A_2$

definiert werden und beschreibt den Wärmestrom, der von Fläche  $A_1$  des einen Körpers zu Fläche  $A_2$  des zweiten Körpers fließt.  $\sigma_S^{A_{12}}$  ist die Strahlungskonstante der jeweiligen Anordnung und entspricht für zwei graue Flächen der Formel

$$\sigma_S^{A_{12}} = \frac{1}{\frac{1-\epsilon_{E,A_1}}{\epsilon_{E,A_1}} + \frac{1}{\varphi_{A_{12}}} + \frac{1-\epsilon_{E,A_2}}{\epsilon_{E,A_2}} \frac{A_1}{A_2}} \sigma_{St}. \quad (2.14)$$

$\sigma_S^{A_{12}}$	Strahlungskonstante der Flächen $A_1$ und $A_2$
$\epsilon_{E,A_1}$	Emissionsgrad Fläche $A_1$
$\varphi_{A_{12}}$	Einstrahlzahl der Flächen $A_1$ und $A_2$
$\epsilon_{E,A_2}$	Emissionsgrad der Fläche $A_2$
$\sigma_{St}$	Stefan-Boltzmann-Konstante

Die Strahlungskonstante berücksichtigt über  $\epsilon_{E,A_1}$  und  $\epsilon_{E,A_2}$  die strahlungsphysikalischen Eigenschaften und die Größe der Flächen  $A_1$  und  $A_2$ . Weiterhin wird unter Zuhilfenahme der Einstrahlzahl  $\varphi_{12}$  die Orientierung der Flächen relativ zueinander mit einbezogen und ermöglicht eine genaue Betrachtung verschiedener Anordnungen [52]. Dadurch wird berücksichtigt, ob sich Flächen eines Körpers gegenseitig anstrahlen. Dies ist für einen TEG von großer Bedeutung. Ausschlaggebend für eine effektive Umwandlung von thermischer in elektrische Energie ist ein hoher

Bedeutung für  
TEG

Temperaturunterschied zwischen den beiden Außenseiten eines TEG. Die Abgabe von Strahlungsenergie und die gleichzeitige Aufnahme von Strahlung aus der Umgebung wirken sich nachteilig auf die Stromgewinnung aus. Sowohl die heißen keramischen Flächen, als auch die Schenkel strahlen einen Teil der eigenen thermischen Energie ab, erwärmen so die kalte Seite sowie umliegende kältere Schenkel und sorgen für eine leichte Annäherung der Temperaturen aller Komponenten. Da die abgestrahlte Wärme proportional zur vierten Potenz der Temperatur ist, macht sich diese Annäherung besonders bei hohen Temperaturen bemerkbar. Die Autoren in [54] stellten eine Verschlechterung von bis zu 0,56 % fest.

### 2.4.3 Wirkungsgrad und Gütezahl

Ziel einer thermoelektrischen Anwendung ist es, dem Modul die zur Verfügung stehende thermische Energie bestmöglich zuzuführen und dort über den Seebeck-Effekt in elektrische Energie umzusetzen. Der Wirkungsgrad gibt an, wie viel der bereitgestellten thermischen Energie in elektrische Energie umgewandelt wird. Ganz allgemein gilt

$$\eta = \frac{P_{TEG}}{\dot{Q}_{in}}. \quad (2.15)$$

$\eta$	Systemwirkungsgrad
$P_{TEG}$	vom TEG generierte Leistung
$\dot{Q}_{in}$	Wärmestrom, der einem System zugeführt wird

Bei einer Anwendung kann zwischen dem Systemwirkungsgrad und dem reinen Modulwirkungsgrad unterschieden werden. Der Systemwirkungsgrad berücksichtigt thermische Kontakte und Verluste an die Umgebung<sup>6</sup>. Der Modulwirkungsgrad konzentriert sich auf einen einzelnen TEG. Zur Bestimmung des theoretisch möglichen Modulwirkungsgrads müssen die genauen Oberflächentemperaturen des TEG bekannt sein. Dann gilt:

$$\eta_{TEG} = \frac{T_h - T_k}{T_h} \frac{\sqrt{1 + ZT} - 1}{\sqrt{1 + ZT} + \frac{T_k}{T_h}}. \quad (2.16)$$

<sup>6</sup>In [20] werden die Grenzen noch weiter gefasst und der Systemwirkungsgrad schließt das Fahrzeug und die Auswirkungen einer TEG-Integration auf dieses in das System mit ein.



$\eta_{TEG}$	Wirkungsgrad eines TEG
$T_h$	Temperatur der heißen Seite
$T_k$	Temperatur der kalten Seite
$ZT$	Gütezahl

Da ein thermoelektrischer Generator zu den Wärmekraftmaschinen<sup>7</sup> gezählt wird, unterliegt er auch der Begrenzung durch den Carnot-Wirkungsgrad. Dieser stellt den maximal erreichbaren Wirkungsgrad einer Wärmekraft-Umwandlung dar und wird in Gleichung 2.16 durch den ersten Term repräsentiert. Da der zweite Faktor hauptsächlich durch Materialparameter beeinflusst wird, bleibt der Carnot-Wirkungsgrad die limitierende Größe. Carnot limitiert

Es wird deutlich, dass der Wirkungsgrad, neben einer möglichst großen Temperaturdifferenz, von der Gütezahl  $ZT$  abhängt. Diese beschreibt inwieweit sich ein Material durch seine spezifischen Eigenschaften zur thermoelektrischen Energieumwandlung eignet. Es gilt Gütezahl

$$Z\bar{T} = \frac{S^2 \sigma_{el}}{\lambda} \bar{T} \quad (2.17)$$

$Z\bar{T}$	Gütezahl
$S$	Seebeck-Koeffizient
$\sigma_{el}$	elektrische Leitfähigkeit
$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$\bar{T}$	mittlere Temperatur

mit der mittleren Temperatur

$$\bar{T} = \frac{T_h + T_k}{2}. \quad (2.18)$$

$T_h$	Temperatur der heißen Seite
$T_k$	Temperatur der kalten Seite

Im weiteren Verlauf wird auf den Querstrich bei der Angabe von  $ZT$  verzichtet, da durch die Spezifizierung  $T_h$  und  $T_k$  eine Eindeutigkeit der Temperaturen gegeben ist. Die Gleichung 2.17 veranschaulicht die Bedeutung der thermischen und

---

<sup>7</sup>Maschinen zur Umwandlung von thermischer in nutzbare Energie, in diesem Fall in elektrische Energie

Wiedemann-  
Franz'sches  
Gesetz

der elektrischen Leitfähigkeit für eine thermoelektrische Energiewandlung. Um eine möglichst hohe Gütezahl für ein Material oder eine Materialpaarung zu erzielen, muss die elektrische Leitfähigkeit möglichst groß und die Wärmeleitfähigkeit möglichst gering sein. Diese Anforderung widerspricht jedoch teilweise dem Wiedemann-Franz'sche Gesetz. Dieses beschreibt eine proportionale Verbindung zwischen den beiden genannten Materialparametern. Das Absenken der Wärmeleitfähigkeit über Leitungselektronen, um einen möglichst hohen Anteil an thermischer Energie im Modul elektrisch umzusetzen, statt sie ungenutzt durch das Material zu leiten, führt unter Berücksichtigung des Sachverhalts

$$\lambda = \sigma_{el} L T \quad (2.19)$$

$\lambda$	Wärmeleitfähigkeit
$\sigma_{el}$	Elektrische Leitfähigkeit
$L$	Lorenz-Zahl
$T$	Temperatur

Einfluss der  
Dotierung

folglich ebenfalls zu einer Reduktion der elektrischen Leitfähigkeit. Diese sollte jedoch möglichst groß sein, um die ohm'schen Verluste so gering wie möglich zu halten und die generierte elektrische Energie gut abführen zu können. An diesem Punkt kommen die verschiedenen Formen der Wärmeleitung vorteilhaft zum Tragen. In Metallen und stark dotierten (entarteten) Halbleitern, in welchen die Wärmeleitung maßgeblich über Elektronen stattfindet, ist der Einfluss des Wiedemann-Franz'sches Gesetz sehr groß. Bei nicht entarteten Halbleitern, in welchen die Wärmeleitung zu großen Teilen von Phononen und nur geringfügig von Elektronen getragen wird, wirkt sich der Sachverhalt nur auf einen kleinen Teil der Wärmeleitung aus. [55]

Insofern besteht die Möglichkeit Einfluss auf die phononischen Komponenten zu nehmen, somit die Wärmeleitfähigkeit zu reduzieren und den wichtigen elektrischen Teil aufrecht zu halten. So kann die Wärmeleitfähigkeit angepasst werden und der Einfluss auf die elektrische Leitfähigkeit wird möglichst gering gehalten. [56]

Warum  
Halbleiter?

Abbildung 2.8 zeigt deutlich, aus welchem Grund hauptsächlich Halbleiter als Schenkelmaterial für thermoelektrische Generatoren eingesetzt werden. Auf der Abszisse des Diagramms ist die Ladungsträgerdichte aufgetragen. Die Ordinate bildet den Seebeck-Koeffizienten, den  $ZT$ -Wert, die thermische und die elektrische Leitfähigkeit ab. Der Zusammenhang von thermischer und elektrischer Leitfähigkeit führt in Verbindung mit dem Einfluss des Seebeck-Koeffizienten zu einem Maximum des  $ZT$ -Wertes im Bereich der Halbleiter und bei einer Ladungsträgerdichte

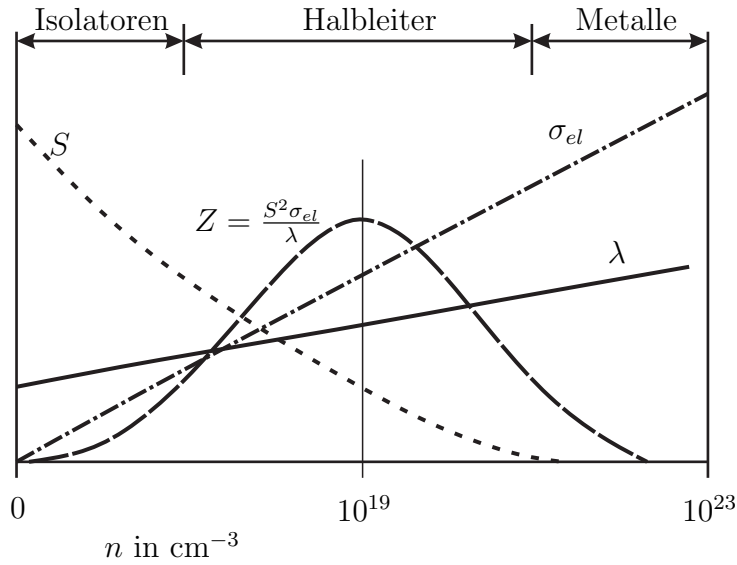


Abbildung 2.8: Bedeutung des Materials für die Güte der thermoelektrischen Wandlung, in Anlehnung an [57]

von  $10^{19} \text{ cm}^{-3}$ . Um dieses Maximum nutzen zu können, sollten die thermoelektrischen Schenkel eines TEG aus Halbleitermaterialien (und deren Legierungen) wie beispielsweise Bismut, Silizium oder Skutterudit bestehen. In [53] wird auf den genauen Zusammenhang von Wärmeleitfähigkeit und Ladungsträgerdichte eingegangen. Gängig ist es, gleiche Materialien mit einer unterschiedlichen Dotierung einzusetzen. So wechseln sich p- und n-dotierte Schenkel ab, führen zu einem großen relativen Seebeck-Koeffizienten und weisen gleichzeitig ähnliche thermischen Eigenschaften auf. Die Vorteile von vergleichbaren thermischen Materialparametern werden im Abschnitt 2.6 näher erläutert. Weiterhin wird eine Diffusionsbarriere auf die Schenkel aufgebracht, um die Dotierung dauerhaft zu gewährleisten. Dieser zusätzliche Materialverbund stellt aus thermomechanischer Sicht eine mögliche Schwachstelle dar (vgl. Abschnitt 3.4).

Weiterhin ist zu beachten, dass jeder eingesetzte Halbleiter für eine bestimmte Temperatur eine maximale Gütezahl erreicht. Abhängig von der jeweiligen Anwendung muss somit ein geeignetes Material gewählt werden, um die Basis für eine möglichst gute thermoelektrische Abwärmewandlung zu bilden. In Abbildung 2.9 sind Materialien mit ihren  $ZT$ -Werten für einen weiten Temperaturbereich zu sehen. Die Daten in der Abbildung verdeutlichen, dass es Materialien gibt, die in einem breiten Temperaturspektrum einsetzbar sind und andere, die einen engeren Temperaturbereich abdecken, jedoch höhere  $ZT$ -Werte erreichen können. Wie die Autoren in [12] beschreiben, können auch je nach Abwärmetemperatur mehrere Materialien zu segmentierten Schenkeln zusammengesetzt werden und führen so zu einer Erweiterung des thermischen Einsatzbereichs. Ein Teil der Schenkel

Temperatur-  
abhängigkeit der  
Gütezahl

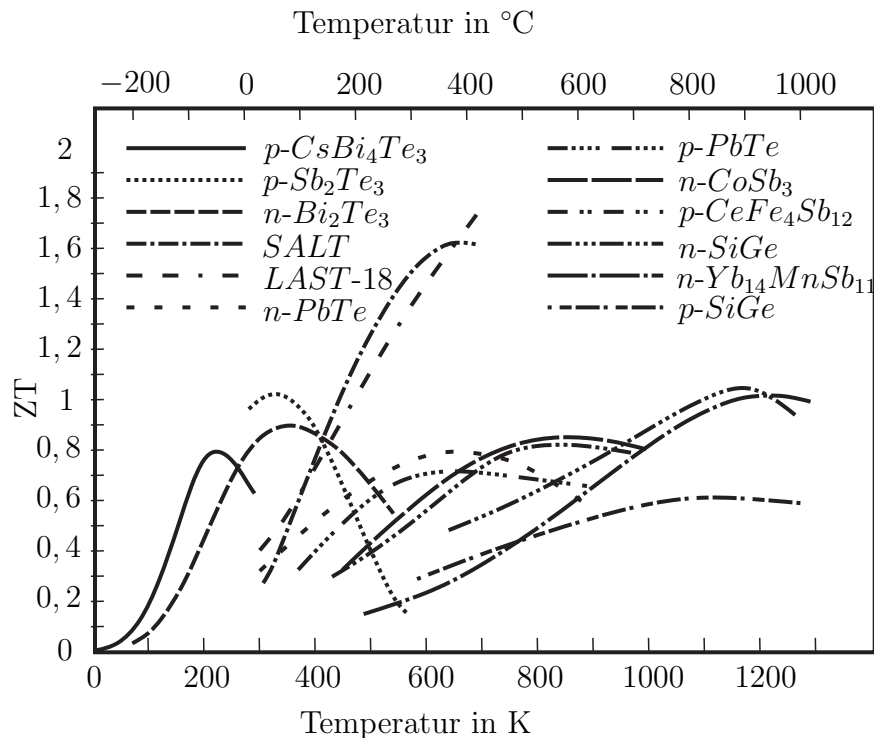


Abbildung 2.9:  $ZT$ -Verlauf verschiedener Materialien für unterschiedliche Einsatztemperaturen, in Anlehnung an [58]

kann so beispielsweise für höhere Temperaturen optimiert sein und wird auf der heißen Seite der Anwendung verbaut. Die weniger temperaturbeständigen Materialien werden entsprechend auf der kalten Seite der Anwendung eingesetzt. Bei der Materialwahl bleibt jedoch zu beachten, dass sowohl die thermoelektrischen als auch die rein thermischen Eigenschaften aufeinander abgestimmt werden müssen. Hier sind besonders der Ausdehnungskoeffizient  $\alpha$  und die Poissonzahl  $\nu$  der Materialien von Bedeutung, die eine genaue Abstimmung erfordern. Die Längenänderung der beiden Stoffe muss ähnlich sein, um Beschädigungen durch ungleiche Verformung vorzubeugen. Wie entscheidend die Kenntnis der Geometrieänderung eines Stoffes, bedingt durch eine Temperaturänderung ist, wird im Abschnitt 2.6 erläutert.

#### 2.4.4 Materialentwicklungen

Wie bereits in diesem Kapitel erwähnt, setzt sich die Wärmeleitfähigkeit aus verschiedenen Komponenten zusammen. Diese Tatsache ermöglicht ein angepasstes Materialdesign. Hierbei wird die elektrische Komponente der Wärmeleitfähigkeit nicht verändert; die phononischen Anteile können jedoch durch verschiedene Prozesse reduziert werden. Die Autoren in [55] schlagen unter Anderem die lose Ein-

bettung von atomaren Teilchen in Gitterstrukturen vor, um so die phononischen Anteile der Wärmeleitfähigkeit gezielt zu streuen. In [45] wird beschrieben, wie ein optimales thermoelektrisches Material aufgebaut sein muss: als PGEC („Phonon-Glass Electron-Single-Crystal“) bezeichnete Verbindungen mit einer ähnlichen niedrigen Wärmeleitfähigkeit wie Glas und einer hohen elektrischen Leitfähigkeit wie sie in einer Kristallstruktur auftritt. Weiterhin können, angepasst an die Einsatztemperaturen, vorzugsweise Materialien mit hohem Atomgewicht verwendet werden, da die vom Gitter gesteuerte Wärmeleitfähigkeit bei diesen Stoffen geringer ist [59]. Ebenso besteht die Möglichkeit, zusätzliche Atome oder Gitterfehler in das Material zu integrieren. Diese Inhomogenitäten stellen Streuzentren dar und verhindern eine gleichmäßige Ausbreitung der Gitterbewegung. Auf diese Weise wird der phononische Anteil der Wärmeleitfähigkeit ebenfalls reduziert und trägt zum Anstieg des Wirkungsgrades bei.

Eine weitere Option die thermische Leitfähigkeit zu senken, bietet die Materialoptimierung durch Nanostrukturierung. Die Herstellung der Schenkel aus Nanopartikeln führt zu vielen kleinen Korngrenzen, die wiederum als Streuzentren für die Gitterschwingungen dienen. So wird die gleichmäßige Ausbreitung von Gitterschwingungen verhindert. [12]

Nanostrukturierung

Darüber hinaus können sogenannte Übergitter eingesetzt werden. Mit diesem Ausdruck werden gestapelte Schichten mit Dicken im Nanometerbereich bezeichnet, die variabel ausgerichtet sein können. Zur Senkung der Gitterschwingungen und somit eines Teils der Wärmeleitfähigkeit sollten die Grenzen der einzelnen Schichten idealerweise senkrecht zur Ausbreitungsrichtung der Phononen ausgerichtet werden. In Abbildung 2.10 wird der Grund hierfür deutlich: liegen die Grenzflächen parallel zur Ausbreitungsrichtung, können sowohl Elektronen als auch Phononen das Material passieren. Eine Reduktion der thermischen Leitfähigkeit wird durch parasitäre Wärmeleitung in den Barrierschichten kompensiert. Eine senkrechte Ausrichtung der Barrieren blockiert die Phononen und führt zu Streuprozessen, während die Elektronen sich weiter ungehindert ausbreiten können. Mit diesem Design wird ebenfalls ein Teil der Wärmeleitfähigkeit unterdrückt. Die genannten Konzepte weisen aktuell noch Herausforderungen, wie eine ausreichende Temperaturstabilität oder die ökonomische Produzierbarkeit, auf. Zusammenfassend wird deutlich, dass die Auslegung der Materialstruktur die Wärmeleitfähigkeit maßgeblich beeinflusst und eine Stellschraube zur Optimierung der zukünftigen thermoelektrischen Energiewandlung darstellt. [60]

Übergitter

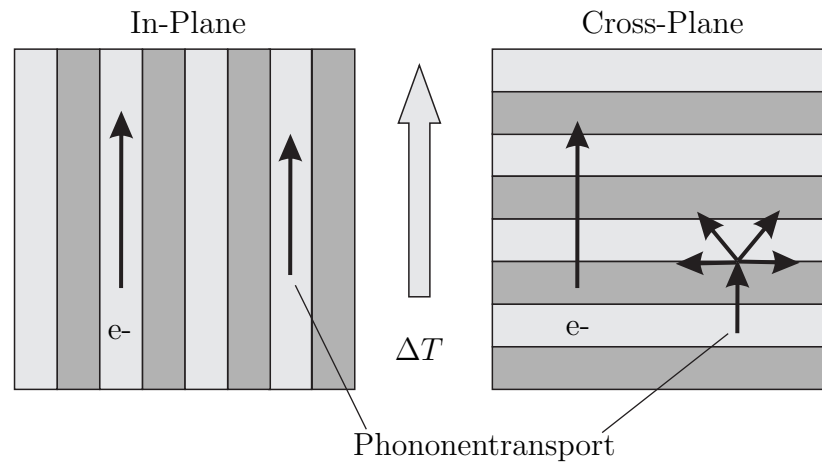


Abbildung 2.10: Einfluss eines Übergitters auf den Wärmetransport, in Anlehnung an [61]

## 2.5 Bisherige Anwendungen und künftige Entwicklungen

Temperatur-  
differenz  
notwendig

Allgemein betrachtet, können thermoelektrische Generatoren überall da eingesetzt werden, wo Abwärme und eine Kühlung zur Verfügung stehen. Hierzu zählen diverse Industrieanwendungen bei denen durch exotherme chemische Reaktionen thermische Energie frei wird, Abkühlvorgänge beispielsweise in der metallverarbeitenden Industrie oder Anwendungen in der Solartechnik. Das Temperaturniveau der benötigten Temperaturdifferenz ist für die Bewertung der reinen Anwendbarkeit zweitrangig und wird über eine geeignete Materialwahl berücksichtigt. Im Vordergrund steht zunächst das reine Vorhandensein oder die technische Realisierbarkeit einer Temperaturdifferenz; ob zwischen dem menschlichen Körper und seiner Umgebung [62] oder zwischen dem Abgasstrang und dem Kühlkreislauf eines Kfz.

Temperatur der  
Anwendung

Grundsätzlich wird zwischen Nieder-, Mittel- und Hochtemperaturanwendungen unterschieden; gelegentlich ist auch eine Kombination zweier Temperaturbereiche vorstellbar. Anwendungen im unteren Temperaturbereich (Raumtemperatur bis  $100^\circ\text{C}$ ) umfassen Armbanduhren, energieautarke Sensoren und ehemals sogar den Einsatz in Radionuklidbatterien in Herzschrittmachern [63]. Im mittleren Temperaturbereich von  $100$  bis  $500^\circ\text{C}$  gibt es Einsatzfälle in der Industrie zur Datenerfassung und -übertragung. Der Hochtemperaturbereich umfasst die Anwendung im Kfz, Müllverbrennungsanlagen oder Abkühlprozesse in der Eisen- und Stahlindustrie mit Temperaturen von  $500$  bis  $700^\circ\text{C}$ . [12]

## 2.6 Grundlagen der Thermomechanik

Die Thermomechanik beschreibt die Wechselwirkungen des thermischen und mechanischen Verhaltens von Materialien und Bauteilen. Problemstellungen werden mit Hilfe der beiden Disziplinen Kontinuumsmechanik und Thermodynamik gelöst [64]. Die Einleitung in dieses Themengebiet ist für das Verständnis der thermomechanischen Vorgänge in einem TEG von Bedeutung, da bei der Anwendung thermische und mechanische Belastungen zeitgleich auftreten, auseinander resultieren und sich gegenseitig beeinflussen.

### 2.6.1 Thermisches Verhalten eines Körpers

Im Ausgangszustand befindet sich ein Körper auf dem gleichen thermischen Niveau wie die Umgebung und steht mit ihr im thermischen Gleichgewicht. Die Beaufschlagung des Körpers mit thermischer Energie führt zunächst zur Änderung der Oberflächentemperatur und zu einem thermischen Ungleichgewicht im Körper selbst und zwischen dem Körper und seiner Umgebung. Die zugeführte thermische Energie bewirkt weiterhin eine Änderung der Abmessungen: wird dem Körper thermische Energie zugeführt und so seine Temperatur erhöht, dehnt er sich üblicherweise aus. Bei Abfuhr thermischer Energie, sinkt die Temperatur und die Abmessungen des Körpers verringern sich in der Regel. Diese Änderung des Volumens kann für eine homogene Temperaturverteilung im einfachsten (stationären) Fall für nur eine Richtung über die Längenänderung

Änderung der  
Abmessungen

$$\Delta l = l_0 a \Delta T \quad (2.20)$$

$\Delta l$	Längenänderung
$l_0$	Ursprungslänge
$a$	Wärmeausdehnungskoeffizient
$\Delta T$	Temperaturdifferenz

ausgedrückt werden. Der Wärmeausdehnungskoeffizient  $a$  ist eine materialspezifische, temperaturabhängige Größe. Die Temperaturabhängigkeit ist bei den betrachteten Materialien jedoch so gering, dass sie als konstant angenommen wird.

Die neue Länge des Körpers beträgt dann

$$l_1 = l_0 + \Delta l. \quad (2.21)$$

---

$l_1$	neue Länge
$l_0$	Ursprungslänge
$\Delta l$	Längenänderung

Die Zusammenführung der Gleichungen 2.20 und 2.21 führt zu

$$l_1 = l_0 + l_0 a \Delta T. \quad (2.22)$$

Sobald eine inhomogene Temperaturverteilung vorliegt, kann der Körper nicht mehr als Ganzes betrachtet werden und die Temperatur wird ortsabhängig. Zur Vereinfachung wird der Körper hierzu in  $n$  Abschnitte unterteilt und kann so für jeden Ort einzeln betrachtet werden. Gleichung 2.22 wird für einen Abschnitt des Körpers umgewandelt in

$$l_{i1} = l_{i0} + l_{i0} a \Delta T_i. \quad (2.23)$$

Die Summe aller  $n$  Teilstücke ergibt die neue Gesamtlänge des Körpers

$$\sum_{i=0}^n l_{i1} = l_1 \quad (2.24)$$

und

$$l_1 = l_0 + \sum_{i=0}^n l_{i0} a \Delta T_i. \quad (2.25)$$

Für

$$n \rightarrow \infty \text{ und}$$

$$l_{i0} \rightarrow 0$$



wird Gleichung 2.25 mit infinitesimal kleinen Teilstücken zu

$$l_1 = l_0 + \int_{s=0}^{l_0} a \Delta T(s) ds. \quad (2.26)$$

Gleichzeitig kommt es zwischen den Teilstücken des Körpers durch die unterschiedlichen Temperaturen zu einem Wärmestrom, der erst versiegt, wenn alle Teile dieselbe Temperatur haben.

### 2.6.2 Mechanisches Verhalten eines Körpers

Die in 2.6.1 beschriebene freie Verformung eines Körpers wird nun in einen komplexeren Zusammenhang gestellt. Es wird folgender Sachverhalt betrachtet: ein aus den Materialien A und B bestehender Körper, dessen Ausdehnung in z-Richtung vollständig blockiert wird und dessen Schichten A und B auf unterschiedliche Temperaturen gebracht werden. Es ergeben sich folgende Zusammenhänge für Material A:

$$\epsilon_{A,x} = a_A(T_A - T_0) + \frac{\sigma_{A,x}}{E_A} - \nu_A \frac{\sigma_{A,y} + \sigma_{A,z}}{E_A} \quad (2.27)$$

$$\epsilon_{A,y} = a_A(T_A - T_0) + \frac{\sigma_{A,y}}{E_A} - \nu_A \frac{\sigma_{A,x} + \sigma_{A,z}}{E_A} \quad (2.28)$$

$$\epsilon_{A,z} = a_A(T_A - T_0) + \frac{\sigma_{A,z}}{E_A} - \nu_A \frac{\sigma_{A,x} + \sigma_{A,y}}{E_A}. \quad (2.29)$$

$\epsilon_{A,x}$	Dehnung des Materials A in x-Richtung
$\epsilon_{A,y}$	Dehnung des Materials A in y-Richtung
$\epsilon_{A,z}$	Dehnung des Materials A in z-Richtung
$\alpha_A$	Ausdehnungskoeffizient des Materials A
$T_A$	Temperatur von Material A
$T_0$	Anfangstemperatur
$E_A$	Elastizitätsmodul von Material A
$\nu_A$	Poissonzahl von Material A
$\sigma_{A,x}$	Spannung in Material A in x-Richtung
$\sigma_{A,y}$	Spannung in Material A in y-Richtung
$\sigma_{A,z}$	Spannung in Material A in z-Richtung

Für das zweite Material B ergeben sich die entsprechenden Gleichungen, indem der Index A durch B ersetzt wird.

Durch die Blockierung der Ausdehnung in z-Richtung gilt

$$\epsilon_{A,z} + \epsilon_{B,z} = 0. \quad (2.30)$$

Unter der Annahme, dass es sich um isotrope Materialien handelt, gilt zudem

$$\epsilon_{A/B,x} = \epsilon_{A/B,y} = \epsilon_{A/B,xy} \quad (2.31)$$

und somit auch

$$\sigma_{A/B,x} = \sigma_{A/B,y} = \sigma_{A/B,xy}. \quad (2.32)$$

Bei einer gleichen Fläche von A und B in der x-y-Ebene ergibt sich durch den Kraftfluss in z-Richtung

$$\sigma_{A,z} = \sigma_{B,z} = \sigma_z. \quad (2.33)$$

Die Annahmen vereinfachen die Gleichungen 2.27 - 2.29 zu

$$I \quad \epsilon_{A,xy} = a_A(T_A - T_0) + \frac{\sigma_{A,xy}}{E_A} - \nu_A \frac{\sigma_{A,xy} + \sigma_z}{E_A} \quad (2.34)$$

$$II \quad \epsilon_{B,xy} = a_B(T_B - T_0) + \frac{\sigma_{B,xy}}{E_B} - \nu_B \frac{\sigma_{B,xy} + \sigma_z}{E_B} \quad (2.35)$$

$$III \quad 0 = a_A(T_A - T_0) + \frac{\sigma_z}{E_A} - \nu_A \frac{2\sigma_{A,xy}}{E_A} + \\ a_B(T_B - T_0) + \frac{\sigma_z}{E_B} - \nu_B \frac{2\sigma_{B,xy}}{E_B}. \quad (2.36)$$

Da keine Biegung zugelassen wird und auch das Ablösen der Schichten voneinander nicht ermöglicht werden soll, ist

$$IV \quad \epsilon_{A,xy} = \epsilon_{B,xy} = \epsilon_{xy}. \quad (2.37)$$

Die vereinfachende Annahme einer gleichen Materialdicke führt zu

$$V \quad \sigma_{A,xy} = \sigma_{B,xy} = \sigma_{xy}. \quad (2.38)$$

Werden die Beziehungen IV und V in die Gleichungen I-III eingesetzt, ergeben sich drei Gleichungen mit den drei Unbekannten  $\epsilon_{xy}$ ,  $\sigma_z$  und  $\sigma_{xy}$ . Der betrachtete Fall gibt einen fest eingespannten, vereinfachten TEG unter thermischer Belastung mit idealisierten Randbedingungen wieder und es lassen sich daher auch noch mit vertretbarem Aufwand Lösungen berechnen. Bei einem realen TEG mit einer komplexeren Geometrie, mehreren Materialien und Temperaturgradienten in seinen einzelnen Bestandteilen wird eine solche Rechnung jedoch extrem aufwändig oder ist gar nicht mehr analytisch durchzuführen. In dieser Situation ist der Einsatz einer Simulation auf Basis der Finite-Elemente-Methode (FEM) eine Möglichkeit zu belastbaren Ergebnissen zu kommen.

Hilfsmittel FEM



## KAPITEL 3

---

# Messtechnik zur Analyse von TEG

---

Die derzeitige Messtechnik stellt TEG-Hersteller wie Anwender vor große Herausforderungen. Eine fehlende Standardisierung und verschiedene Messtechniken erschweren einheitliche Aussagen bei einer TEG-Charakterisierung. In diesem Kapitel werden aktuelle Charakterisierungsmethoden vorgestellt und die, für die Charakterisierung in dieser Arbeit, verwendete Messtechnik, eingehend beschrieben. Ebenso werden ein Interferometer zur Verformungsmessung vorgestellt und die Grundlagen durchgeführter FEM-Simulationen besprochen.

### 3.1 Herausforderungen bei der Charakterisierung

Thermoelektrische Generatoren bieten ein breites Einsatzspektrum und sollen nicht nur als Nischenanwendung genutzt werden, sondern massenmarkttauglich oder zumindest universeller einsetzbar werden. Hierzu ist der Wirkungsgrad und der thermische Einsatzbereich von großer Bedeutung. Um die Verwendbarkeit eines TEG für eine spezielle Anwendung überprüfen zu können, ist die Kenntnis der

Messtechnik auf  
Anwendung  
abstimmen

Einsatztemperaturen auf Anwendungsseite und die Gütezahl sowie der Wirkungsgrad (Modul und Gesamtsystem) auf Modulseite Voraussetzung für eine sinnvolle Bewertung und Verwendung. In Abschnitt 2.4 wird angeführt, dass verschiedene Anwendungstemperaturen unterschiedliche Materialien als Basis für einen TEG erfordern. So können Beschädigungen des Moduls ausgeschlossen und der TEG mit der höchstmöglichen Leistungsausbeute betrieben werden. Außerdem stellt die genaue Charakterisierung eines Moduls eine Grundvoraussetzung für präzise Aussagen zur Leistungsfähigkeit dar. Verlässliche Messergebnisse sind als Eingangsdaten für Systemmodellierungen gleichermaßen unabdingbar, um Rekuperationssysteme effektiv und wirtschaftlich auszulegen. Neben der Angabe des Wirkungsgrads gewinnt eine bessere Kenntnis der auftretenden Verformungen und Spannungen zur Lebensdauerabschätzung des Generators allgemein an Bedeutung. Besonders für den Einsatz im Kfz werden höchste Anforderungen an die Stabilität und die Langlebigkeit eines TEG gestellt. Die Akzeptanz des Kunden kann nur durch einen verlässlichen Betrieb gewonnen werden. Dieser muss vor dem Einbau genau untersucht werden und erfordert eine verlässliche Messtechnik. Diese sollte im Idealfall die generierte Leistung und die auftretenden Belastungen des TEG erfassen.

Keine  
Standardisierung

Eine große Herausforderung im Bereich der Charakterisierung stellt aktuell eine nicht vorhandene Standardisierung dar. Weder Vorgaben für Messgeräte, noch durchzuführende Tests sind festgelegt und erschweren so eine einheitliche und aussagekräftige Modulvermessung. Kommerziell erhältliche Messgeräte sowie Prototypen erheben den Anspruch, aussagekräftige und korrekte Werte zu liefern.

Große Varianz  
der Resultate

In [65] präsentiert der Autor Ergebnisse eines Ringversuchs<sup>1</sup>. Mehr als zehn Forschungsinstitute und Firmen nahmen an dieser Studie teil und haben ein Modul unabhängig voneinander mit verschiedenen Messgeräten nach genauen Vorgaben vermessen. Die starke Streuung der Ergebnisse in den Abbildungen 3.1 und 3.2 zeigt deutlich, wie wichtig eine Vereinheitlichung der Charakterisierung ist. Dies ist bisher nicht geschehen. Gerade im Bereich höherer Temperaturen fallen im Diagramm in Abbildung 3.1 starke Abweichungen zwischen den Ergebnissen der Versuchsteilnehmer auf. Der Wirkungsgrad variiert über die Temperaturdifferenz zwischen 0,8 und 2,0 % für Differenzen von etwa 50 K, bis hin zu 1,75 und 5 % bei Differenzen über 120 K. Für Automobilanwendungen stehen Temperaturdifferenzen von etwa 400 K zur Verfügung, was noch höhere Abweichungen vermuten lässt. Die generierte Leistung in Abbildung 3.2 zeigt ebenfalls eine große Bandbreite von gemessenen Werten. Im unteren Temperatursegment werden Leistungen zwischen 0,1 und 1,2 W erzielt. Im oberen Temperaturbereich treten Werte zwischen 0,2 und 4 W auf. Diese deutliche Streuung macht es nahezu unmöglich eine fundierte Aussage

---

<sup>1</sup>Im Rahmen dieses Ringversuchs wurde mit dem für diese Arbeit eingesetzten Messgerät ebenfalls eine Charakterisierung durchgeführt.

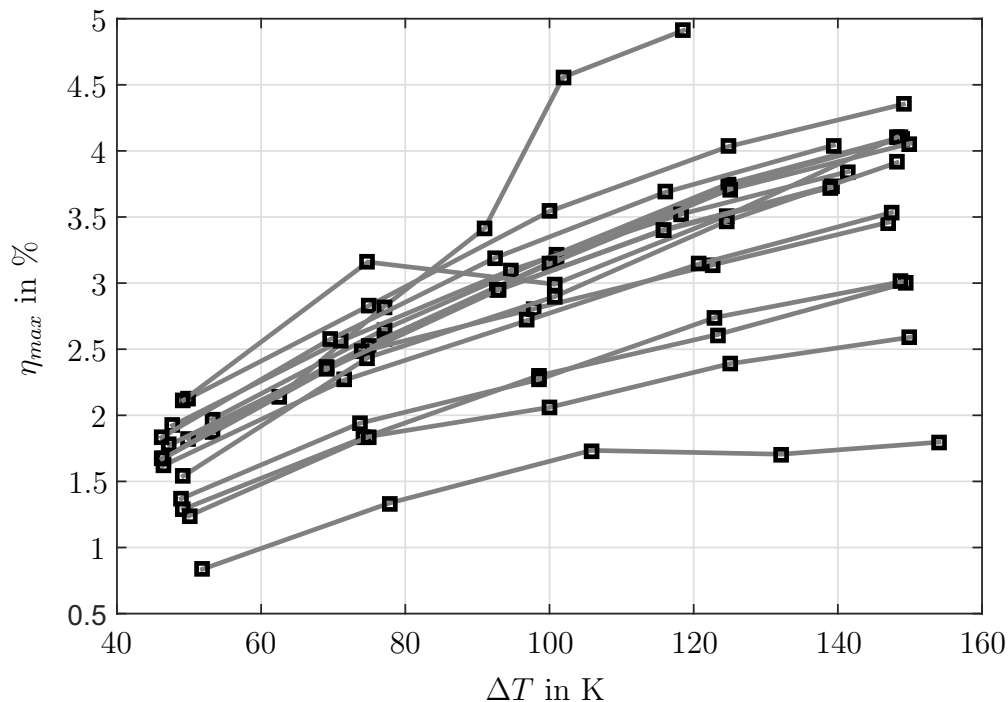


Abbildung 3.1: Ergebnisse der Wirkungsgradmessungen des Ringversuchs aller anonymen Teilnehmer, in Anlehnung an [65]

über Wirkungsgrad und Leistung des TEG zu treffen. Da die einzelnen Messgeräte und Details der Messungen der verschiedenen Versuchsteilnehmer nicht bekannt sind, ist es schwierig eine Aussage über mögliche systematische Messabweichungen zu treffen. Die Ergebnisse in Abbildung 3.1 lassen auf einen Nullpunktversatz schließen, während die Messdaten in Abbildung 3.2 eher auf einen Maßstabsfehler hindeuten [66]. Dennoch ist die Ermittlung einer eindeutigen Ursache mit den vorliegenden Werten nicht möglich.

## 3.2 Möglichkeiten zur Charakterisierung von TEG

Im Rahmen dieser Arbeit werden unterschiedliche Messtechniken eingesetzt, um neben der üblichen Charakterisierung auch das mechanische Verhalten eines TEG zu untersuchen. Generell ist die Charakterisierung eines TEG notwendig, um die Einsatzfähigkeit hinsichtlich Temperaturen, Effizienz und Anbindungstechnik zu überprüfen. Relevante Messgrößen für eine Modulcharakterisierung sind die Heiß- und Kaltseitentemperatur, der Wärmestrom durch das Modul, der Wirkungsgrad, die elektrische Leistung, der elektrische Strom, der Seebeck-Koeffizient sowie die

Grundsteine der  
Charakterisierung

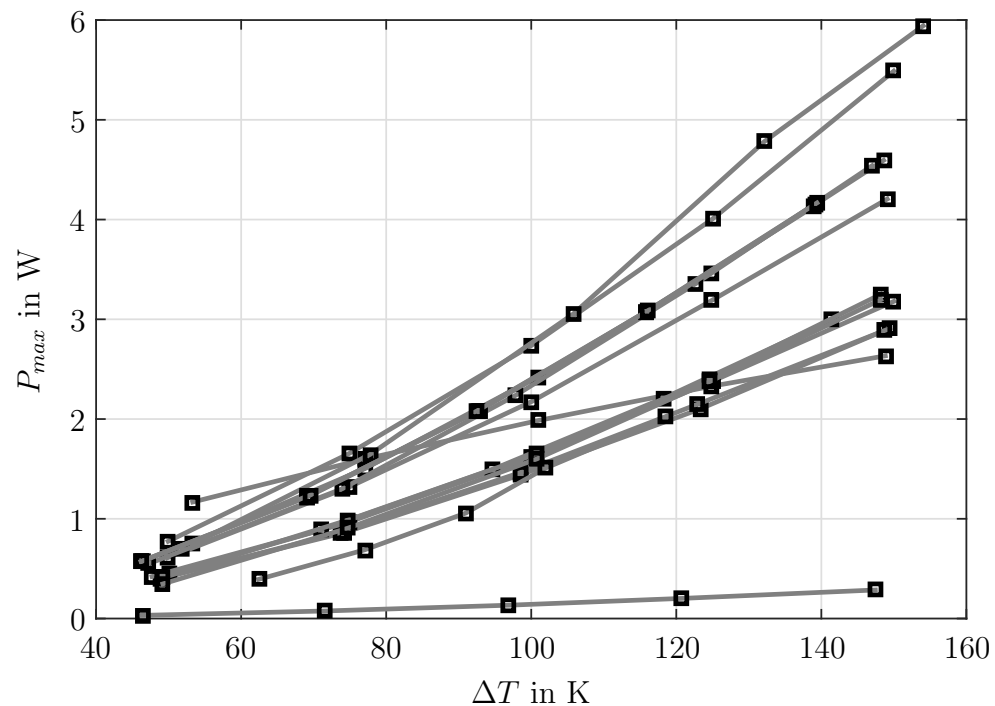


Abbildung 3.2: Ergebnisse der Leistungsmessungen des Ringversuchs aller anonymen Teilnehmer, in Anlehnung an [65]

thermische und elektrische Leitfähigkeit. Es sind zwei grundlegend verschiedene Messtechniken zur Charakterisierung von thermoelektrischen Generatoren bekannt, die nachfolgend beschrieben werden.

### 3.2.1 Harman-Methode

Die Harman-Methode wird an dieser Stelle nur kurz erläutert, da sie nicht Gegenstand der weiteren Betrachtungen ist. Die Methode ermöglicht eine Bestimmung der Gütezahl ohne weitere thermoelektrische Parameter zu messen. Einzig der direkte Einfluss von Peltier- und Seebeck-Effekt auf die zu messende Klemmenspannung des TEG wird in Relation zum ohm'schen Spannungsbeitrag gesetzt, um den effektiven  $ZT$ -Wert des Moduls zu ermitteln. Hierzu wird ein TEG an eine Stromquelle angeschlossen. Zu Beginn der Messung zum Zeitpunkt  $t = 0$  mit  $T_h = T_k$  ist keine Potentialdifferenz zwischen den beiden Anschlusskabeln eines TEG vorhanden und die gemessene Spannung ist folglich Null. Zum Zeitpunkt  $t_1$  wird der Strom auf  $I > 0$  erhöht und der Verlauf der Spannung  $U_{Ref} = IR$  aufgezeichnet. Aufgrund des Peltier-Effekts entsteht ein Temperaturunterschied zwischen den beiden Seiten des TEG. Die auftretende Temperaturdifferenz bedingt den Seebeck-Effekt

Direkte  
Bestimmung von  
 $ZT$



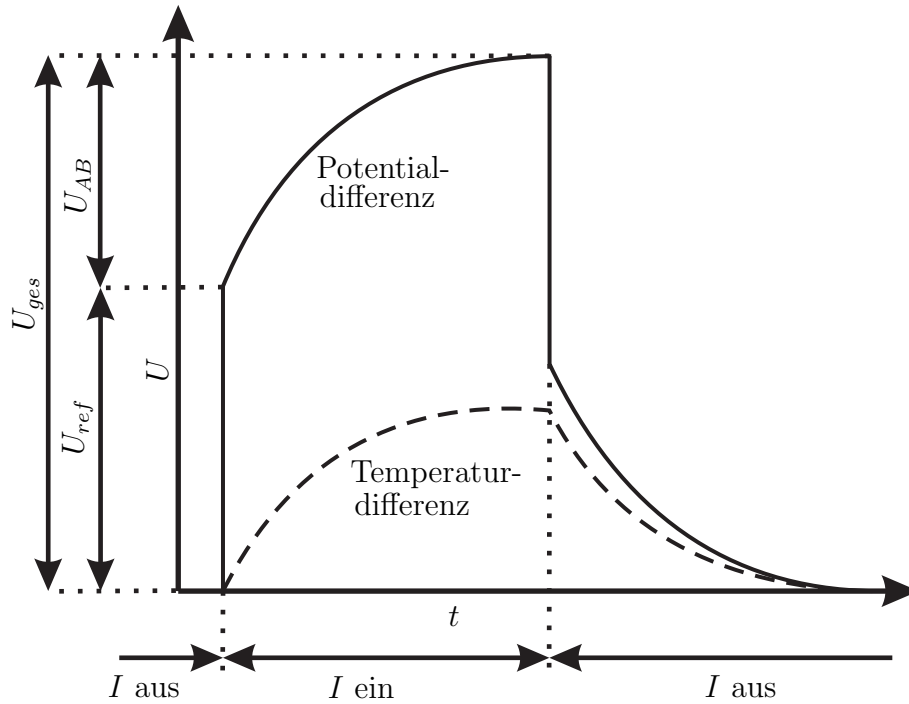


Abbildung 3.3: Spannungsverlauf zur Bestimmung von  $ZT$  nach Harman, in Anlehnung an [67]

und führt zu einer Spannungsänderung, die in Abbildung 3.3 sichtbar wird. Unter adiabaten Bedingungen gilt für die leicht messbare Spannung  $U_{ges}$

$$U_{ges} = U_{Ref} + U_{AB}, \quad (3.1)$$

$U_{ges}$	Gesamtspannung
$U_{ref}$	Referenzspannung
$U_{AB}$	Thermospannung der Materialien A und B

wobei  $U_{AB}$  die aus Abschnitt 2.3.1 bereits bekannte Seebeck-Spannung und  $U_{ref}$  die eingestellte Referenzspannung ist. Unter Zuhilfenahme der von Harman entdeckten Abhängigkeit

$$ZT = \frac{U_{ges}}{U_{Ref}} - 1 \quad (3.2)$$

erfolgt die Berechnung der Gütezahl der untersuchten Probe. Nach dem Abschalten des Stroms sinkt die Referenzspannung wieder auf 0. Ohne Stromfluss tritt kein Peltier-Effekt auf und auch der Wärmefluss kommt zum Erliegen. Die thermische Angleichung der beiden Moduleseiten hat ein Absinken der Seebeck-Spannung zur Folge.

Grundsätzlich sind eine genaue Messung und Berechnung möglich. In der Praxis gestaltet sich die Verwendung dieser Methode als überaus schwierig. Zum einen müssen ideale Zustände vorliegen oder eine Korrektur der Verluste vorgenommen werden. Zum anderen werden im Rahmen der Harman-Methode keine weiteren Parameter bestimmt. Gerade die Bestimmung von Parametern wie die Wärmeleitfähigkeit sind in der Praxis jedoch von Interesse. Aus diesem Grund wird die Harman-Methode selten verwendet.

Beschränkt  
einsetzbar

### 3.2.2 Wärmestromermittlung

Die zweite Methode zur Bestimmung von  $ZT$  basiert auf der Berechnung des Wärmeflusses durch den TEG. Über den Wärmefluss werden im Nachgang alle gewünschten Parameter, wie die Wärmeleitfähigkeit, der Wirkungsgrad und der  $ZT$ -Wert, berechnet. Die Betrachtung des Wärmestroms dient als Leistungsbilanz. Die dem TEG zugeführte thermische Leistung, die mittels Seebeck-Effekt umgewandelte elektrische Leistung und die auf der kalten Seite in Form von Restwärme abgegebene Leistung werden bilanziert. Der grobe Aufbau dieser Technik ist in Abbildung 3.4 dargestellt. Zur Bestimmung des Wärmestroms dienen zwei Referenzblöcke bekannten Materials mit einem linearen Temperaturverlauf über die Materialdicke. Zwischen die Blöcke wird der zu untersuchende TEG eingebracht. Der Referenzblock an der heißen Seite des TEG wird mit einer Wärmequelle (z.B. einer elektrischen Heizung) verbunden; hier können Graphitfolien oder vergleichbare Wärmeleitmaterialien eingesetzt werden, um die thermische Anbindung sicherzustellen (siehe Abschnitt 2.4.2). Die kalte Seite des TEG wird über einen weiteren Referenzblock mit einer Wärmesenke verbunden und sorgt für die Abfuhr der Restwärme. Im vorliegenden Fall wird ein Wärmetauscher von einem angeschlossenen Umwälzkühler mit entsprechend temperiertem Silikonöl als Kühlmedium versorgt. Auch hier muss eine gute thermische Anbindung vom Wärmetauscher zum TEG unter Zuhilfenahme von Wärmeleitmaterialien gewährleistet werden.

Leistungsbilanz  
als Basis

In die Referenzblöcke sind in gleichmäßigen Abständen Temperatursensoren eingebracht, welche die Temperaturen im Block messen. Mittels der gemessenen Temperaturdifferenz eines gesamten Blocks und der bekannten Wärmeleitfähigkeit des Referenzmaterials wird die Berechnung des Wärmeflusses durch die beiden Referenzblöcke unter Zuhilfenahme der Formel 2.10 möglich. Unter Vernachlässigung

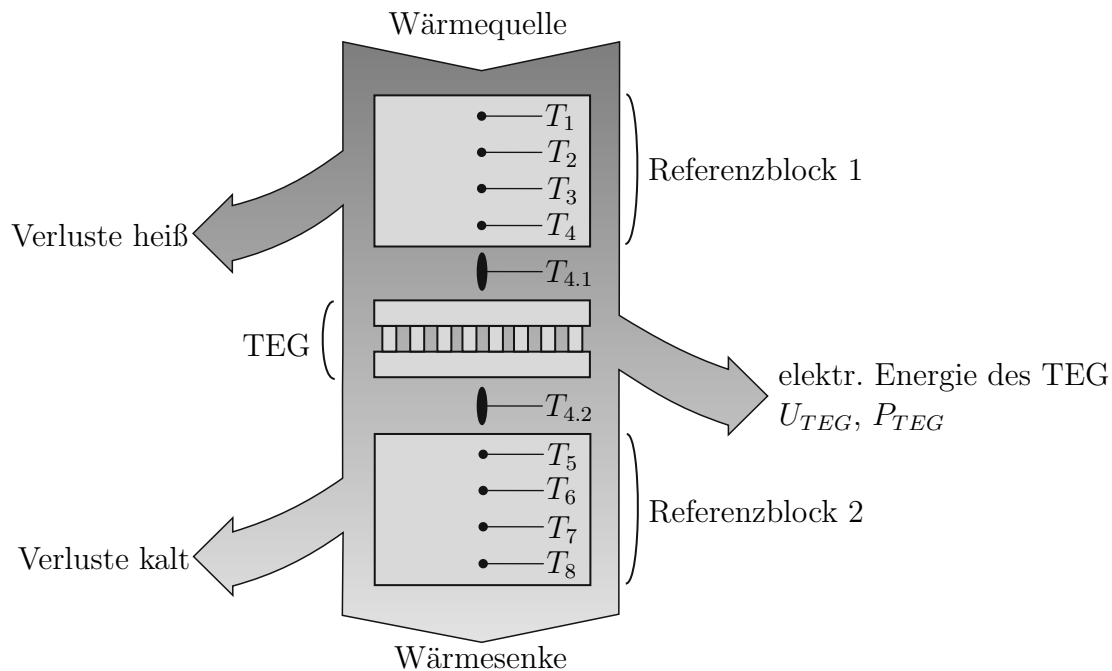


Abbildung 3.4: Schematische Darstellung des Messprinzips auf Grundlage der Wärmestrommessung

von Anbindungsverlusten zwischen Referenzblock und TEG entspricht der errechnete Wärmestrom, der den Referenzblock 1 verlässt, dem Wärmefluss, der in den thermoelektrischen Generator fließt. Entsprechendes gilt auch für die kalte Seite (vgl.  $T_{4.1}$  und  $T_{4.2}$  in Abb.3.4). Unter Verwendung dieser Annahme kann eine Leistungsbilanz für den TEG aufgestellt werden, deren genauer Aufbau in Abschnitt 3.3.1 erläutert wird. Eine Extrapolation der Temperaturen an der Moduloberfläche und die Messung der erzeugten Spannung  $U_{TEG}$  und Leistung  $P_{TEG}$  ermöglichen anschließend die Berechnung aller weiteren Messgrößen. Unter Vorgabe fester Temperaturschritte werden die genannten Größen für die jeweilige Anwendung ermittelt.

Wärmestrom-  
bestimmung über  
Referenzblöcke

### 3.3 Verwendete Messtechnik

Die eingesetzte Messtechnik basiert auf der zuvor beschriebenen Wärmestromermittlung. Allerdings handelt es sich im Vergleich zum „Standardmesssystem“ zur TEG-Charakterisierung um einen angepassten Messaufbau, der ohne Referenzblöcke auskommt und zusätzlich die Messung der Verformung eines Moduls ermöglicht. So können, neben Aussagen über den Wirkungsgrad und die generierte Leistung, auch Erkenntnisse über die Verformung eines TEG unter Last gewonnen werden.

Verformungs-  
messung  
möglich

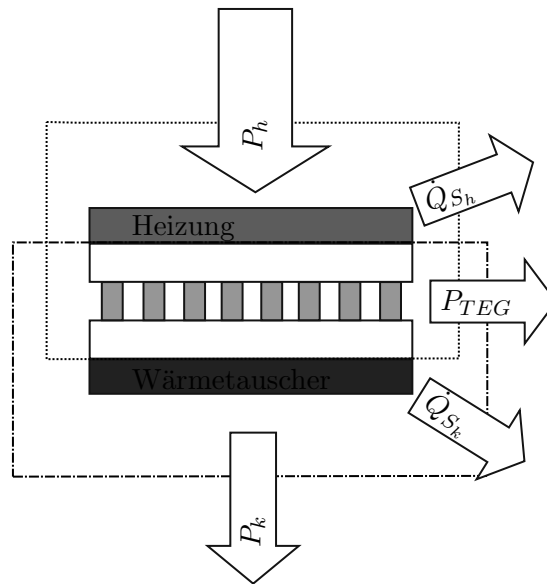


Abbildung 3.5: Mögliche Systemgrenzen für eine Leistungsbilanz am TEG

Die Messtechnik bietet ebenso die Möglichkeit komplexe Temperaturzyklen abzubilden, einen TEG mit einem frei zu definierenden Lastprofil zu beaufschlagen und das resultierende Verhalten zu dokumentieren. Auf diese Weise ist es möglich Lastprofile, die aus Kfz-Fahrzyklen generiert wurden (vgl. Abschnitt 4.2), abzubilden und den TEG unter einer realistischen Belastung zu charakterisieren. Beispielsweise kann so der Wirkungsgrad und die TEG-Verformung während einer Autofahrt bestimmt werden.

Realistische  
Lastprofile

Der Schwerpunkt der durchgeführten Messungen liegt auf der Untersuchung der thermomechanischen Vorgänge. Weiterhin können Messungen zur Charakterisierung der thermoelektrischen Eigenschaften durchgeführt werden, wie es mit herkömmlichen Messsystemen möglich ist. Die Ergebnisse dieser Messungen sind in ihrer Genauigkeit jedoch nicht mit Ergebnissen von darauf spezialisierten Messgeräten zu vergleichen. Dennoch werden die Resultate der thermoelektrischen Messungen in 5.1.2 und 5.2.1 präsentiert, da sie eine sehr gute Abschätzung darstellen.

Effizienzmessung  
weiterhin möglich

### 3.3.1 Leistungsbilanz

Wie einleitend erwähnt, wird bei der eingesetzten Messtechnik auf die Verwendung von Referenzblöcken verzichtet. Die elektrische Leistung, die mittels einer Heizung als thermische Energie ins System gebracht wird, stellt die Wärmequelle für den TEG dar. Diese Leistung kann einfach über die Leistungsaufnahme der Heizung bestimmt werden. Unter Berücksichtigung von Strahlungsverlusten der Heizung

(siehe Abschnitt 2.4.2) wird die gemessene Heizleistung als Wärmefluss, der in den TEG strömt, eingesetzt. Ein auf der TEG-Oberfläche angebrachtes Thermoelement ermittelt die Oberflächentemperatur, die später als Heiseitentemperatur des TEG eingesetzt wird. Sie stellt die Ist-Größe für die in Abschnitt 3.3.2 beschriebene Regelung dar. Auf der kalten Seite erfolgt eine direkte Anbindung an einen Wärmetauscher, der mit einem Umwälzkühler temperiert wird und die Temperaturdifferenz am TEG aufrecht erhält. Ein an der Wärmetauscheroberfläche angebrachter Temperatursensor misst die aktuelle Temperatur, die vereinfachend als TEG-Oberflächentemperatur auf der kalten Seite angenommen wird. Um die Kühlleistung ermitteln zu können, wird mittels eines Coriolis-Masse-Durchflussmessers zunächst der Kühlmittelstrom gemessen. Unter Verwendung der Formeln

$$\dot{m} = \dot{V} \rho \quad (3.3)$$

$\dot{m}$     Massenstrom  
 $\dot{V}$     Volumenstrom  
 $\rho$     Dichte

und

$$\dot{Q}_k = \dot{m} c_p \Delta T \quad (3.4)$$

$\dot{Q}_k$     Wärmestrom, der in das Kühlwasser übertragen wird  
 $\dot{m}$     Massenstrom  
 $c_p$     spezifische Wärmekapazität

erfolgt dann die Berechnung der vom Kühlwasser aufgenommenen thermischen Leistung. Durch die Ermittlung aller zuvor genannten Messgrößen ist anschließend eine Charakterisierung des TEG möglich. Die Leistungsbilanz wird wie folgt aufgestellt:

$$P_h = P_{TEG} + \dot{Q}_S + \dot{Q}_k. \quad (3.5)$$

$P_h$	Heizleistung
$P_{TEG}$	vom TEG generierte Leistung
$\dot{Q}_S$	Verluste durch Strahlung
$\dot{Q}_k$	Wärmestrom, der in das Kühlwasser übertragen wird

Verluste durch Konvektion können vernachlässigt werden, da sich der Aufbau in einer Vakuumkammer befindet.

Notwendige  
Kompromisse

Durch die Wegnahme der Referenzblöcke entfällt die Möglichkeit, über die Temperaturmessung in den Blöcken eine genaue Wärmestrommessung unter Berücksichtigung der Verluste durchzuführen. Das hat zur Folge, dass der berechnete Modulwirkungsgrad fehlerbehaftet ist. Die vorgenommenen Anpassungen des Messgeräts führen jedoch gleichzeitig zu einem platzsparenden Aufbau, der die Integration weiterer Komponenten ermöglicht. Diese sind erforderlich, um die Verformungsmessung zu realisieren. Die Messtechnik ermöglicht weiterhin den Wirkungsgrad auf zwei Arten zu bestimmen, ihn somit abzugleichen und eine reproduzierbare Aussage zu treffen. Auf diese Weise hat der Umbau des Messgeräts keine weiteren Auswirkungen. Je nachdem, wie die Systemgrenzen gewählt werden, kann die Leistungsbilanz für die heiße oder für die kalte Seite aufgestellt werden. Die verschiedenen gewählten Grenzen sind in Abbildung 3.5 dargestellt. Entsprechend gilt

$$\eta_h = \frac{P_{TEG}}{P_h - \dot{Q}_{S_h}} \quad (3.6)$$

und

$$\eta_k = \frac{P_{TEG}}{P_{TEG} + \dot{Q}_k + \dot{Q}_{S_k}} \quad (3.7)$$

mit

$$\dot{Q}_S = \dot{Q}_{S_h} + \dot{Q}_{S_k} \quad (3.8)$$

und

$$\eta_h \stackrel{!}{=} \eta_k. \quad (3.9)$$

$\eta_h$	Wirkungsgrad; Berechnung über heiße Seite
$\dot{Q}_{S_h}$	Strahlungsverluste der heißen Seite
$\eta_k$	Wirkungsgrad; Berechnung über kalte Seite
$\dot{Q}_{S_k}$	Strahlungsverluste der kalten Seite

Die Strahlungsverluste werden mit Hilfe der gemessenen Temperaturen und der Geometrie der abstrahlenden Teile abgeschätzt. Die Bestimmung des Wirkungsgrades über die heiße Seite sollte im Idealfall denselben Wert ergeben, wie die Bestimmung über die kalte Seite. In der Praxis werden sich die beiden Werte unterscheiden, da unter Anderem die vereinfachte Berücksichtigung der Verluste unterschiedlichen Einfluss nimmt.

### 3.3.2 Temperaturregelung des Messgeräts

Die Regelung gängiger Messgeräte zur Charakterisierung thermoelektrischer Generatoren muss es ermöglichen gezielt stationäre Temperaturen sowohl für die heiße, als auch die kalte Seite des TEG einzustellen. Die Einschwingzeit ist bei dieser Art der Messung zweitrangig, da lediglich konstante Betriebspunkte benötigt werden. Daher kann jeweils abgewartet werden, bis sich der gewünschte stationäre Betriebspunkt langsam und mit der benötigten Genauigkeit eingeschwungen hat. Bei einem Messgerät, das dynamische Zyklen abbilden soll, ist eine kurze Einschwingzeit jedoch erstrebenswert. Um mit der eingesetzten Messtechnik die Analyse von Temperaturzyklen zu ermöglichen, muss die Regelungstechnik des Prüfstandes an diese Anforderungen angepasst werden. Das Hauptaugenmerk liegt dabei auf der Heizungsregelung, um die stark variierende Abgastemperatur wiedergeben zu können. Die Regelung des Umwälzkühlers wird nicht angepasst, da die Temperatur des Kühlkreislaufs eines Kfz relativ konstant ist und keiner gesonderten Betrachtung bedarf. An dieser Stelle wird auf die Regelung des Umwälzkühlerherstellers zurückgegriffen.

Angepasste  
Regelung  
notwendig

Abhängig von der Regeldifferenz zwischen Solltemperatur und Isttemperatur an der heißen Seite werden zwei Regelansätze verwendet. Bei einer großen Differenz zwischen dem Soll- und dem Istwert wird die Heizung mit voller Leistung betrieben, um einen schnellen Anstieg der Temperatur realisieren zu können. Bei kleinen Differenzen zwischen Soll- und Istwert wird ein kaskadierter Regler, bestehend aus zwei P-Reglern, genutzt. Die Entscheidung, wann die Regelung aktiviert wird oder nicht, beruht auf empirisch erhobenen Daten. Wie in Abbildung 3.6 deutlich wird, passt der innere Regler der Kaskade die Änderung der Temperatur pro Zeit an, während der äußere Regler dafür zuständig ist den Absolutwert der Temperatur zu regeln. Da die eingesetzte Heizung lediglich die Zustände „An“ und „Aus“ kennt,

Kaskadierte  
Regelung

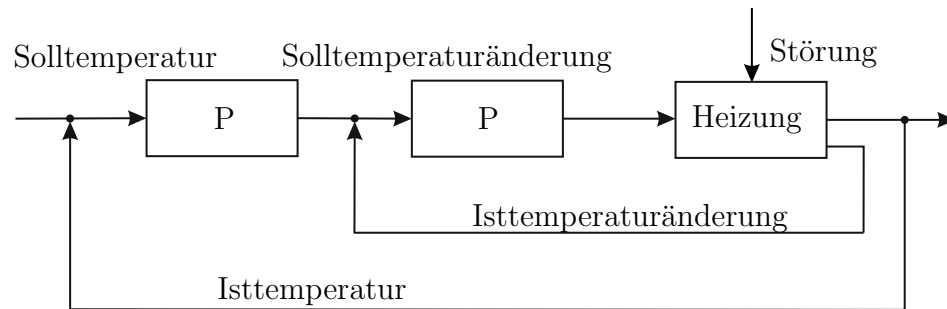


Abbildung 3.6: Blockschaltbild des kaskadierten Reglers

wird die Stellgröße des Reglers über eine Pulsweitenmodulation (PWM) in ein verwertbares Signal umgewandelt. Auf diese Weise ist es möglich, die Heizung mit einer kurzen Einschwingzeit zu regeln und einen dynamischen Zyklus abzubilden.

#### Sprungantwort

Um die Funktionalität des Reglers darzustellen, wird zunächst das Regelverhalten bei einem einfachen Temperatursprung analysiert. Daraus kann eine Aussage über das Einschwingverhalten und die Regelgeschwindigkeit sowie die Genauigkeit gewonnen werden. Abbildung 3.7 zeigt das Regelverhalten bei einem Sprung von etwa  $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  auf  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Die Steigung beträgt  $2,33\text{ }^{\circ}\text{C/s}$  und bis zu dem Zeitpunkt des kurzen Überschwingens wird die Heizung bei voller Leistung mit  $530\text{ W}$  betrieben. Anschließend wird die Regelung aktiv und regelt auf eine konstante Heizungstemperatur von  $194\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Es wird deutlich, dass die Solltemperatur in kurzer Zeit erreicht werden kann, was für eine dynamische Messung mit großen Temperatursprüngen von Bedeutung ist. Nach etwa  $400\text{ s}$  ist zu erkennen, dass die Temperatur oszilliert. Die Ursache hierfür ist der Start einer Messung. Durch die Änderung des angelegten Widerstands (siehe Abschnitt 4.1.1) wird die Leistungsaufnahme des TEG verändert. Aus diesem Grund ändert sich auch der Wärmestrom, der von der Heizung abgeführt wird und beeinflusst so den Heizungsregler.

#### Keine aktive Kühlung

Weiterhin wird sichtbar, dass die Heizung den TEG nur aktiv erwärmen, aber nicht kühlen kann: das „Sägezahnmuster“ weist zwei unterschiedlich steile Flanken auf. Beim Erwärmen hängt die Steigung von der zugeführten elektrischen Energie ab, beim Abkühlen wird die Abkühlkurve des Systems dargestellt, die sich aus den thermischen Verlusten an die Umgebung ergibt. Eine aktive Kühlung der Heißseite war im Rahmen des Projektes nicht realisierbar und aus diesem Grund muss die leichte Abweichung der Ist- von der Solltemperatur akzeptiert werden.

Bei Temperatursprüngen hin zu höheren Temperaturen nehmen die genannten Verluste an die Umgebung zu. In Abbildung 3.8 ist das Regelverhalten bei drei Temperatursprüngen dargestellt:

- $120\text{ }^{\circ}\text{C}$  auf  $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,



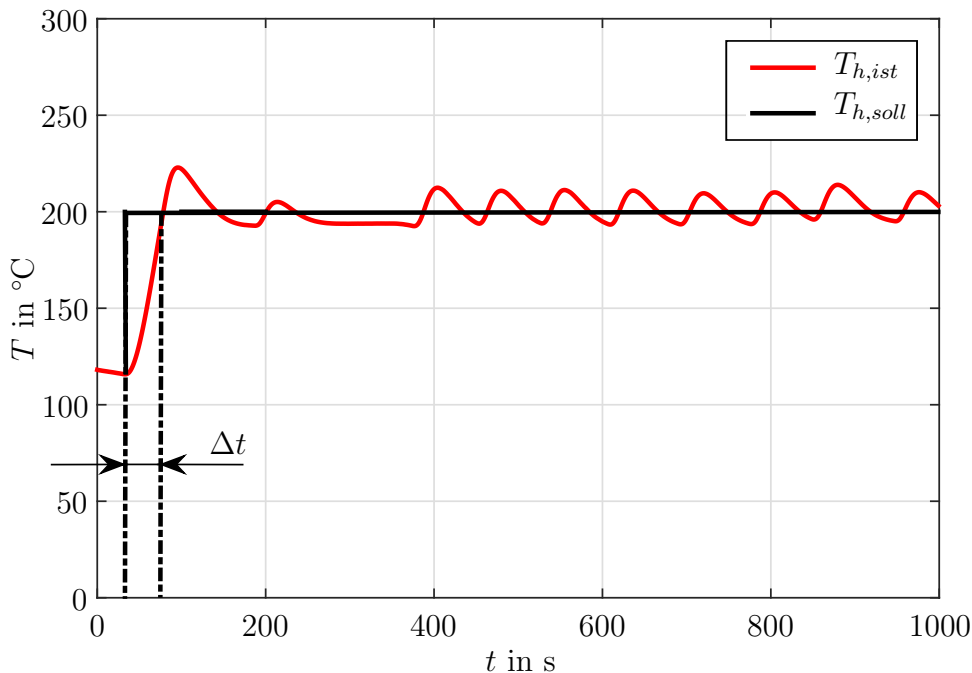


Abbildung 3.7: Sprungantwort des Temperaturreglers

- 200 °C auf 300 °C und
- 300 °C auf 400 °C.

Die Steigung der Sprungantworten nimmt mit höheren Temperaturen ab. Dies spiegelt die Verluste an die Umgebung wider. Diese nehmen zu und können durch die begrenzte Leistung der verbauten Heizung nicht kompensiert werden. Dennoch reicht die Heizgeschwindigkeit aus, um die Temperatursprünge mit der benötigten Güte abzubilden.

Temperatursprünge  
abbildbar

Bei steigenden Temperaturen nimmt auch die Abweichung vom Sollwert zu und der Einfluss einer durchgeführten Messung erschwert die punktgenaue Regelung sichtbar. Da bei den durchgeführten dynamischen Messungen allerdings der generelle zeitliche Verlauf eines Temperaturzyklus wichtiger ist als die Minimierung einer Regeldifferenz, stellt diese Abweichung für den geplanten Einsatz kein Problem dar.

Der Verlauf in Abbildung 3.9 zeigt, wie gut der Regler auf Temperatursprünge reagiert und den dynamischen Zyklus abbildet. Während die Sprünge hin zu hohen Temperaturen gut geregelt werden, scheint der Gesamtverlauf der Isttemperatur im Vergleich zum Sollwert gedämpft. Stark abfallende Temperaturen können aufgrund der fehlenden Kühlung der Heißseite nicht wiedergegeben werden. Aufgrund der Tatsache, dass Wärmetauscher und thermische Kontakte im Abgasstrang in der Realität ebenfalls für eine Dämpfung sorgen und die Wärmekapazität der einzelnen

Fahrzyklus  
abbildbar

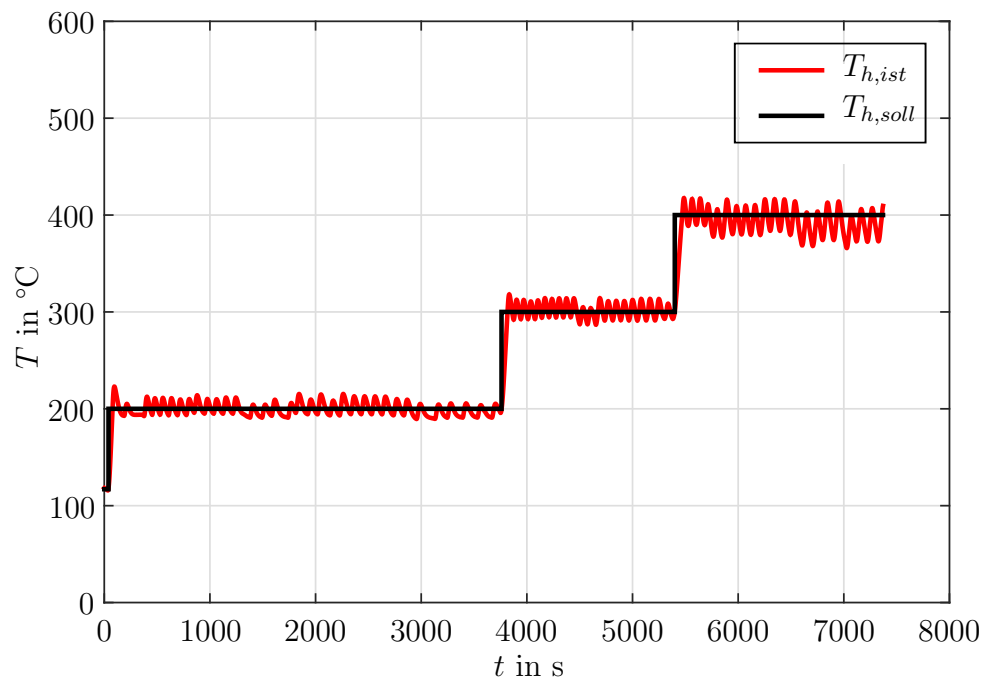


Abbildung 3.8: Einfluss der steigenden Temperaturen auf den Regler

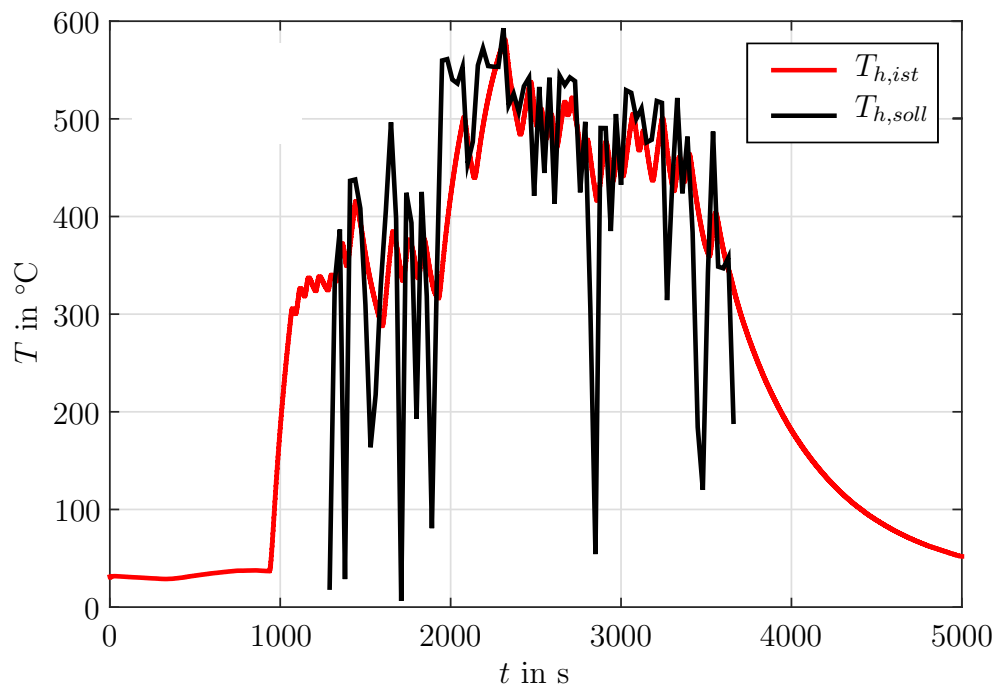


Abbildung 3.9: Soll-/Isttemperaturvergleich eines dynamischen Zyklus

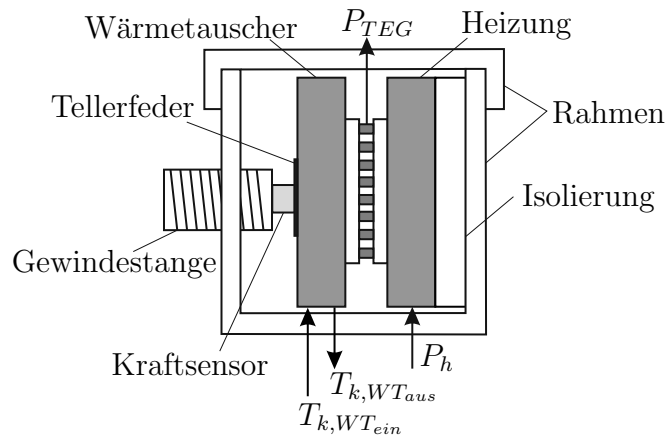


Abbildung 3.10: Schematische Darstellung des Messgeräts

Komponenten ein sprunghaftes Abkühlen verhindern, ist das beschriebene Verhalten des Reglers unproblematisch. Zudem kann die Anzahl der Temperaturwechsel abgebildet werden, was für die Belastungssituation und den TEG von elementarer Bedeutung ist.

### 3.3.3 Erweiterung der Messtechnik

Der grundlegende Aufbau der eingesetzten Messtechnik zur Bestimmung des Wirkungsgrades eines TEG wird in Abschnitt 3.2.2 erläutert. Zur Realisierung der Verformungsmessung wird der Messaufbau mit weiteren zusätzlichen Komponenten ausgestattet. Hierzu zählt ein Kraftsensor, der in den Kraftfluss der sich ausdehnenden Objekte gebracht wird. Mit Hilfe eines Rahmens wird der TEG zwischen der Heizung und dem Wärmetauscher fixiert. Abbildung 3.10 zeigt, dass weiterhin eine Tellerfeder und der Kraftsensor in den Kraftfluss eingespannt werden. Auf die Darstellung des Umwälzkühlers, der den Wärmetauscher temperiert, und die weiteren elektronischen Komponenten wird in der schematischen Darstellung verzichtet. Die Feder dient zum Schutz des Moduls vor Beschädigungen durch eine starre Verspannung und lässt gleichzeitig eine Verformung durch die Temperaturvariation zu. Ausgelöst durch eine Temperaturänderung verformen sich die Komponenten und beeinflussen die Einspannkraft, die vom Kraftsensor erfasst wird. Die Verformung der nicht relevanten Komponenten (Heizung, Wärmetauscher) würde ohne weitere Messungen zur Verfälschung der Ergebnisse führen. Aus diesem Grund werden zu Beginn Leermessungen ohne TEG durchgeführt und eine Funktion zur Darstellung des thermischen Verhaltens dieser Komponenten ermittelt. Somit ist es möglich die Ausdehnung der anderen Komponenten aus den Messergebnissen herauszurechnen. Unter Berücksichtigung der bekannten temperaturabhängigen Federkonstanten kann anschließend die reine TEG-Verformung berechnet werden.

Erweiterung um  
Feder und  
Kraftsensor

Einsatz eines  
induktiven  
Sensors

Um die Verformung auf einem zweiten Weg zu messen, wird ein induktiver Sensor genutzt. In Abbildung 3.5 wird deutlich, dass der Abstand zwischen der Heizung und dem Wärmetauscher genau der Moduldicke des TEG entspricht. Folglich gibt die Messung dieses Abstandes die Verformung des TEG wieder. Sobald sich der TEG zwischen Wärmetauscher und Heizung ausdehnt, resultiert daraus eine Änderung des Abstands der beiden Komponenten. Diese wird von dem induktiven Sensor registriert.

Das Messsystem ist damit in der Lage, neben der Bestimmung der elektrischen Leistung eines TEG über einen gesamten (realen) Fahrzyklus, das thermomechanische Verhalten durch die Verformungsmessung sichtbar zu machen.

### 3.3.4 Electronic Speckle Pattern Interferometry

Laser erzeugt  
individuelles  
Oberflächenbild

Im Mittelpunkt der Untersuchungen, die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführt werden, steht das thermomechanische Verhalten von thermoelektrischen Generatoren. Mit der zuvor beschriebenen Messtechnik sind die Messung der Modulausdehnung und der auftretenden Kräfte im eingebauten Zustand und somit unter realen Bedingungen möglich. Ergänzend wird die freie Verformung eines TEG in unverbautem Zustand mittels Electronic Speckle Pattern Interferometry (ESPI) untersucht. Anders als die zuvor beschriebene Messtechnik kann ein Interferometer Formänderungen in der Größenordnung der Wellenlänge des eingesetzten Lasers auflösen [68]. Sobald Licht auf eine Oberfläche trifft, wird dieses reflektiert. Abhängig von den Eigenschaften des Lichts und der Oberfläche ergibt sich ein individuelles Bild der Reflektion. Trifft kohärentes<sup>2</sup> Licht eines Lasers auf eine glatte Oberfläche, wird der Lichtpunkt wie von einem Spiegel zurückgeworfen. Bei dem Auftreffen des Laserstrahls auf eine optisch raue Oberfläche<sup>3</sup>, überlagern sich gestreute Lichtstrahlen und bilden ein Interferenzmuster aus. Die Überlagerung der Strahlen führt dazu, dass Teile einer Welle mit einer anderen Welle scheinbar zufällig zusammentreffen und helle und dunkle Flecken erzeugen. Diese Flecken werden als Speckle bezeichnet und sind charakteristisch für jede Oberfläche. Unter Temperatureinfluss verändert sich die Oberfläche und ergibt ein neues, für diesen Zustand charakteristisches Bild. Zur Messung einer Verformung wird die Differenz zweier Bilder aufeinanderfolgender Zeitschritte (Start- und Endzustand) analysiert und

<sup>2</sup>Kohärenz bezeichnet die Beziehung verschiedener Wellenzüge zueinander. Entstehen Wellenzüge in gleichen räumlichen und zeitlichen Abständen, handelt es sich um eine konstante Beziehung der Phasen und um kohärentes Licht. Bei der Emission von Licht einer Glühlampe werden in zeitlich zufälligen Abständen Wellenzüge ausgesendet, die keine feste Beziehung zueinander haben und inkohärent sind.

<sup>3</sup>optisch rau bedeutet, dass die Rauigkeit der Oberfläche in der Größenordnung der Wellenlänge des Lasers liegt

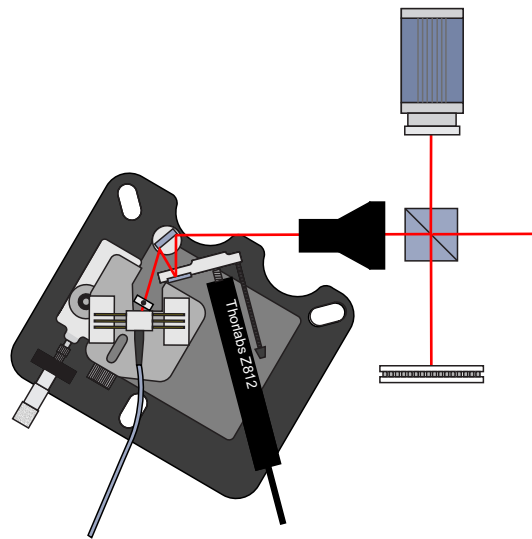


Abbildung 3.11: Aufbau des ESPI

daraus ein Abbild der Oberfläche erstellt. Dies bedeutet, die Differenz aus einem Bild vor einer Verformung und einem Bild während/nach einer Verformung lässt eine Aussage über die Größe der Verformung zu.

Um eine gezielte Überlagerung von Reflexionen zu erzeugen und eine Aussage über die Veränderung einzelner Zustände zu gewinnen, wird das Interferometer nach Michelson aufgebaut (Detail ins [69]). Den grundlegenden Aufbau zeigt Abbildung 3.11. Ein Laserstrahl wird durch einen Strahlteiler in zwei gleich große Teilstrahlen aufgeteilt und teilweise umgeleitet. Einer der beiden Strahlen trifft auf die zu untersuchende Oberfläche, der andere wird auf eine Referenzfläche geleitet. Die Reflexion der beiden Teilstrahlen wird im Strahlteiler wieder zu einem Strahl. Dieser beleuchtet den CCD-Chip einer Kamera und bildet dort ein Interferenzmuster. Dieses Muster gibt zunächst nur Aufschluss über die Oberflächenbeschaffenheit. Die Aufnahme aufeinanderfolgender Speckle-Bilder unterschiedlicher Zustände enthält dann über die Differenz entsprechende Informationen zur wirklichen Verformung.

Michelson-  
Interferometer

Sobald sich die zu untersuchende Oberfläche des TEG aufwölbt, lässt die Differenz der beiden entstehenden Speckle-Bilder eine Aussage über die Verformung zu. Diese thermomechanische Belastung gilt es in der vorliegenden Arbeit zu untersuchen. Unter Einsatz entsprechender Algorithmen und Filter entsteht ein Bild mit „Höhenlinien“, das in ein dreidimensionales Abbild der Oberfläche umgewandelt werden kann. Dieser Schritt erweitert das Interferometer zu einem ESPI. Weitere Details zu Specklen können in [70] nachgelesen werden. In [69] und [71] wird außerdem der Einsatz von Specklen in der Messtechnik eingehend beschrieben. Ebenso ist in [72] die Untersuchung eines Peltierelements mittels ESPI bei festen Temperaturen beschrieben, um Simulationen des Modulverhaltens zu verifizieren.

Differenz zweier  
Zustände

## 3.4 Mechanische Lastsituation

Auftretende  
Spannungen

Wie in Abschnitt 2.6 beschrieben, führt die Behinderung von thermischer Ausdehnung zu mechanischen Spannungen. Besonders ein TEG, der zwischen einer Wärmequelle und einer Wärmesenke eingespannt wird und sich während des Betriebs versucht zu verformen, ist solchen Spannungen ausgesetzt. Die auftretenden Spannungen können durch die zusätzliche Einspannung des Bauteils, durch eine stationär oder instationär inhomogene Temperaturverteilung und durch unterschiedliche Ausdehnungskoeffizienten bei Verbundwerkstoffen und Werkstoffverbunden sowie einer Kombination der genannten Ursachen ausgelöst werden. Die Einspannung eines TEG, der aus unterschiedlichen Materialien besteht und von je einer Seite erwärmt und gekühlt wird, stellt eine Kombination aller Ursachen dar. In 2.6.2 wird gezeigt, dass bereits eine vereinfachte Darstellung eines TEG die Verwendung beispielsweise einer FEM-Simulation erfordert.

### 3.4.1 FEM-Simulation des thermomechanischen Verhaltens

Einleitung FEM

Die Finite-Elemente-Methode ist ein Näherungsverfahren, um komplexe, lineare und nichtlineare Probleme zu lösen. Bei Festigkeits- und Schwingungsanalyse, Strömungsvorgängen oder Temperaturfeldern kann das Verhalten komplexer Strukturen häufig nicht mehr analytisch berechnet werden und so wird eine Approximation der Lösung durch einfachere Funktionen angestrebt. [73] Hierzu wird ein reales Bauteil auf ein Modell, beziehungsweise eine Idealisierung aus einzelnen endlichen Elementen abgebildet. Die Diskretisierung kontinuierlicher Strukturen in eine finite Menge von Elementen einfacher Gestalt ermöglicht die numerische Lösung des Problems mit Hilfe von Ansatzfunktionen. Die einzelnen Elemente werden über Knoten miteinander verknüpft und diese über Freiheitsgrade definiert. Zu den Freiheitsgraden zählt der Autor von [74] physikalische Größen wie Verformungen/Verschiebungen, Temperaturen oder Potentiale. Die Ansatzfunktionen bieten die Möglichkeit das Verhalten der Einzelelemente über Änderungen im Element, in Abhängigkeit von Änderungen der Knoten zu beschreiben. [75] Unter Verwendung von Anfangs-, Rand- und Übergangsbedingungen, die Lagerungen (Verschiebungen) und Lasten (Kräfte, Momente, Drücke, Temperaturen etc.) abbilden, wird ein möglichst realitätsnahes Modell entwickelt, um eine Übertragbarkeit der Ergebnisse auf die Realität zu ermöglichen. Bei der richtigen Wahl der Bedingungen lassen die Ergebnisse von FEM-Simulationen zum Beispiel eine Bauteiloptimierung zu, um den Produktentwicklungsprozess zu verkürzen. Im Rahmen dieser Arbeit

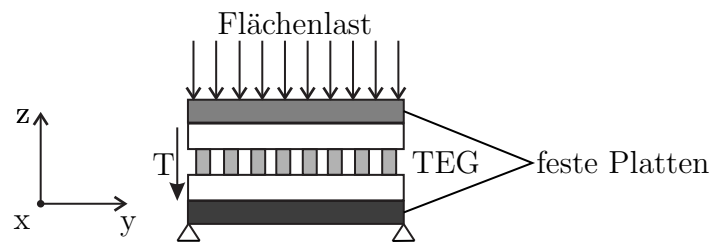


Abbildung 3.12: Schematischer Aufbau der FEM-Simulation

werden FEM-Simulationen genutzt, um eine erste Möglichkeit zu schaffen die TEG-Geometrie auf den Anwendungsfall anzupassen. Die Komplexität der Wärmeübertragung und die daraus resultierenden Verformungs- und Spannungszustände in einem Modul können so vereinfacht dargestellt werden.

### 3.4.2 Parameter der FEM-Simulation

Für die Simulationen im Rahmen dieser Arbeit wird eine gekoppelte Temperatur-Verschiebungsberechnung mit der Software Abaqus durchgeführt. Dabei handelt es sich um die Untersuchung von Verformung und Spannung, ausgelöst durch ein Temperaturfeld. Um auch die Einspannung der Komponenten und die Anbindung an die Heizung/ den Wärmetauscher zu berücksichtigen, wird der TEG in der Simulation von zwei nicht verformbaren Platten umschlossen (vgl. Abbildung 3.12). Die Elemente dieser Platten dienen als Wärmequelle und -senke und werden mit den berechneten Temperaturen der Fahrzyklen beaufschlagt. Weiterhin ist die untere Platte vollständig im Raum verankert und lässt keine Bewegung zu. Die obere Platte wird mit einer Flächenlast, die unter realen Bedingungen dem Anpressdruck entspricht, auf den TEG gedrückt und kann sich so nur beschränkt in z-Richtung, nicht jedoch in x- und y-Richtung, bewegen. Auf diese Weise wird sowohl die Verformungsbehinderung, als auch der Einfluss der Verformung auf die Anbindung an die Wärmequelle/-senke simuliert. Der zeitliche Ablauf der Simulation umfasst die Schritte

Ausgangsmodell

- Anfangsbedingungen,
- mechanische Last und
- thermische Last.

Zu Beginn haben alle Komponenten die gleiche Temperatur und die jeweiligen Freiheitsgrade werden festgelegt. Der erste Schritt der Analyse definiert zunächst die Ausgangssituation. Im zweiten Schritt wird der Druck, mit dem die obere Platte auf dem Modul gehalten wird, vorgegeben. Im dritten und letzten Schritt werden

Ablauf der Simulation

den Platten mit jedem Zeitschritt die vom Zyklus vorgegebenen Temperaturen zugewiesen. Die kombinierte Berechnung der beiden Schritte führt zu Aussagen über die Verformung, welche wiederum den Wärmestrom in den TEG beeinflussen kann. Weiterhin wird die Wärmestrahlung der Isolierung berücksichtigt, die ebenfalls Einfluss auf die Temperaturverteilung nimmt. Kriechen und eine detaillierte Betrachtung der Fügeverbindungen zwischen Isolierung, Leiter und Schenkeln werden hingegen vernachlässigt. Untersuchungen zu den Fügstellen und Kriechvorgängen sind Gegenstand der Forschung. Sie spielen im Rahmen dieser Arbeit allerdings keine Rolle.



## KAPITEL 4

---

# Untersuchungsmethodik und betrachtete Fahrzyklen

---

Zur thermoelektrischen Charakterisierung eines TEG werden stationäre Temperaturen definiert, die als Messeingangsgröße fungieren. Im Realfall wird ein Modul allerdings in den seltensten Fällen mit wenigen festen Temperaturschritten belastet, vielmehr variiert die Temperatur stark je nach Anwendung. Dieser Unterschied und dessen Bedeutung für die durchgeführten Messungen wird in diesem Kapitel behandelt. Zunächst wird erläutert, welche Messungen für eine Charakterisierung notwendig sind. Anschließend wird der Unterschied zwischen reinen effizienzorientierten Messungen und solchen mit thermomechanischem Schwerpunkt herausgearbeitet. Zur Durchführung von thermomechanischen Analysen wird der TEG realitätsnahen Belastungssituationen ausgesetzt. Die Entstehung eines realistischen Lastprofils wird ebenso erläutert, wie der Verlauf verschiedener Fahrzyklen.

## 4.1 Bedeutung der durchgeführten Messungen

Die Analyse von thermoelektrischen Modulen kann in die Bereiche

- Ermittlung des Innenwiderstands,
- Bestimmung von Leistung und Wirkungsgrad und
- Messungen thermomechanischer Größen

Schritte einer  
Charakterisierung

unterteilt werden. Die beiden ersten Schritte beschreiben eine klassische Modulcharakterisierung (erweitert um die wechselnde Belastung). Die Ermittlung des Innenwiderstands ist eine vorbereitende Messung, die vor jeder weiteren thermoelektrischen Analyse notwendig ist. Die Effizienzmessungen umfassen insbesondere die Bestimmung des Seebeck-Koeffizienten, der Wärmeleitfähigkeit, der elektrischen Leitfähigkeit und des Wirkungsgrads. Hierzu werden feste Temperaturschritte vorgegeben und das Modul bei stationären Bedingungen vermessen. Beim realen Einsatz im Kraftfahrzeug liegen jedoch schnelle Temperaturänderungen vor, die den TEG ungleichmäßig belasten. Den Einfluss und die Folgen dieser wechselnden Belastung auf ein Modul gilt es bei Messungen zur Stabilität zu untersuchen. Bei dieser Art der Charakterisierung kann der TEG mit Temperaturwechseln zwischen nur zwei Temperaturen oder realen Temperaturzyklen, zum Beispiel einer Autofahrt, belastet werden. So entsteht die Möglichkeit das Modul auf seine Einsatzfähigkeit in einer bestimmten Anwendung, in diesem Fall im Kfz, zu testen. Außerdem kann die jeweilige Belastung bereits in der Entwicklungsphase berücksichtigt werden und gegebenenfalls das Moduldesign beeinflussen. Auf diese Weise ist es möglich, TEG speziell im Hinblick auf ihre spätere Verwendung hin zu entwickeln und zu optimieren.

### 4.1.1 Vorbereitende Messungen

Widerstands-  
anpassung

Zur Ermittlung der maximalen Leistung eines TEG muss dieser in seinem optimalen Arbeitspunkt betrieben werden. Die Auslegung auf diesen Punkt beinhaltet die Berücksichtigung der für das eingesetzte Material richtigen Temperaturdifferenz und die Anpassung an den inneren Widerstand. Bei einer Versuchsreihe werden verschiedene Temperaturen durchgemessen, meist kontinuierlich auf- oder absteigend, und die anliegende Temperaturdifferenz automatisch dokumentiert. Um die maximale Leistung des TEG zu erzielen, wird eine Leistungsanpassung durchgeführt. Dies wird über eine Widerstandsanpassung realisiert: der TEG wird mit

einer externen elektronischen Last verschaltet und mit verschiedenen Widerständen verbunden. Für jeden Temperaturschritt (bei stationären Bedingungen) werden die verschiedenen Widerstände durchgefahren und die erzeugte Spannung und Leistung gemessen. Beim Erreichen der maximalen Leistung entspricht der externe, gewählte Widerstand dem Modulinnenwiderstand. Auf diese Weise wird der Innenwiderstand des Moduls experimentell bestimmt und kann bei den späteren Messungen voreingestellt werden, um das Modul optimal betreiben zu können.

Da aber die elektrische Leitfähigkeit in verschiedenen Materialien (Halbleitern und Leitern) durch unterschiedliche Effekte beeinflusst wird, ist der Modulinnenwiderstand temperaturabhängig. Während der Innenwiderstand von Metallen mit steigender Temperatur ebenfalls ansteigt, kann der Innenwiderstand von Halbleitern je nach Materialzusammensetzung und Dotierung zu- oder abnehmen. Meist ist jedoch eine Abnahme des Widerstandes bei steigender Temperatur zu beobachten und es wird von einem Heißleiter gesprochen. [76] Je nach Materialeigenschaften der Schenkel dominieren so verschiedene Prozesse und führen bei wachsenden Temperaturen zu einer leichten Zu- oder Abnahme des TEG-Widerstands. Dieses Verhalten müsste bei einer Messung oder späteren Anwendung berücksichtigt werden, um die maximale Leistung auch bei wechselnden Temperaturen zu erhalten. Für eine optimale Einstellung des Widerstands und damit für eine maximale Energieausbeute, muss der Lastwiderstand je nach Anwendung dynamisch eingestellt werden. Nur auf diese Weise kann die maximal mögliche Leistung über einen weiten Temperaturbereich erzielt werden. Besonders beim Einsatz im Kfz, wo die Abgas-temperaturen um mehrere 100 °C schwanken, könnte eine solche Nachführung des Widerstands die Gesamtleistung erhöhen. Allerdings muss der Aufwand für die notwendige Regelung des Widerstands mit berücksichtigt werden.

Temperatur-  
abhängigkeit des  
Widerstandes

### 4.1.2 Effizienzmessungen

Analysen zur Effizienz können in drei Bereiche unterteilt werden: die Analyse

- des thermoelektrischen Materials,
- des Moduls oder
- des gesamten Systems.

Bei allen drei Messungen liegt der Schwerpunkt auf der Messung des maximalen Wirkungsgrads/der Leistung; die reale Lastsituation ist eher zweitrangig. Die Untersuchungen zur Charakterisierung des Materials dienen dazu festzustellen, ob

Unterschiedliche  
Charakterisie-  
rungsansätze

und wie gut sich ein Material für den Einsatz in einem TEG eignet. Bei der Vermessung des Moduls oder Gesamtsystems wird hingegen überprüft, wie gut die Verbindungstechnik im Modul und/oder System ist und wie sehr die Parameter (wie Seebeck-Koeffizient, Wärmeleitfähigkeit oder elektrische Leitfähigkeit) von den ermittelten Materialmessdaten abweichen. Die ermittelten Daten gelten meist nur für einen Auslegungspunkt, in welchem der TEG die maximale Leistung generiert. Zur Ermittlung dieses Punktes werden, unter Berücksichtigung der Ergebnisse der Leistungsanpassung, die Parameter sowie die generierte Leistung bei festen Temperaturen gemessen. Auf diese Weise ist es möglich, den optimalen Einsatzbereich für ein Modul zu bestimmen. Ein ähnliches Vorgehen ist bei der Vermessung eines Gesamtsystems gebräuchlich. Hierzu wird der TEG um die benötigten Komponenten, wie Wärmetauscher oder DC/DC-Wandler, erweitert und es wird überprüft, welche Verluste durch den Einbau zu verzeichnen sind. Häufig sind signifikante Unterschiede zwischen einer reinen Materialcharakterisierung und einer Gesamtsystemcharakterisierung zu erkennen.

In dieser Arbeit werden, neben thermomechanischen Messungen, Wirkungsgrad- und Leistungsmessungen mit konstanten Temperaturschritten und bei wechselnder Belastung durchgeführt und es wird gezeigt, welchen Einfluss das gewählte Lastprofil auf eine Charakterisierung hat. Hierzu werden Messdaten aus realen Fahrten zugrunde gelegt und, wie in Abschnitt 4.1.3 beschrieben, in Belastungsprofile für das Messgerät umgewandelt.

### 4.1.3 Realistische Lastfälle für Kraftfahrzeuge

Ziel der Untersuchungen realitätsnaher Belastungen ist, eine Aussage über die thermomechanischen Vorgänge im TEG während des Einsatzes im Kfz treffen zu können. Um eine möglichst wirklichkeitsgetreue Analyse durchführen zu können, werden real gemessenen Fahrdaten verwendet. Die einzelnen Schritte, bis daraus Ergebnisse gewonnen werden können, sind in Abbildung 4.1 dargestellt.

Datengenerierung

Das generelle Vorgehen kann zwei unterschiedliche Datenquellen haben. Entweder werden die genannten Realdaten verwendet oder es werden Geschwindigkeiten aus einem bekannten Zyklus (Neuer europäischer Fahrzyklus (NEFZ), vgl. [77], Federal Test Procedure (FTP), vgl. [78]) als Ausgangspunkt eingesetzt. Bei einer tatsächlich durchgeführten Fahrt mit einem Kfz, um Realdaten zu gewinnen, werden die aktuelle Position, die Geschwindigkeit und die Beschleunigung aufgezeichnet. Die Daten dienen als Eingangsparameter für eine Simulation (MATLAB), deren Aufbau nachfolgend ebenfalls genauer dargestellt ist. Die Simulation generiert Abgas- und Kühlwassertemperaturen, die zur Analyse eines TEG notwendig sind. In einem letzten Schritt können die Temperaturen nun dazu dienen eine FEM-Simulation

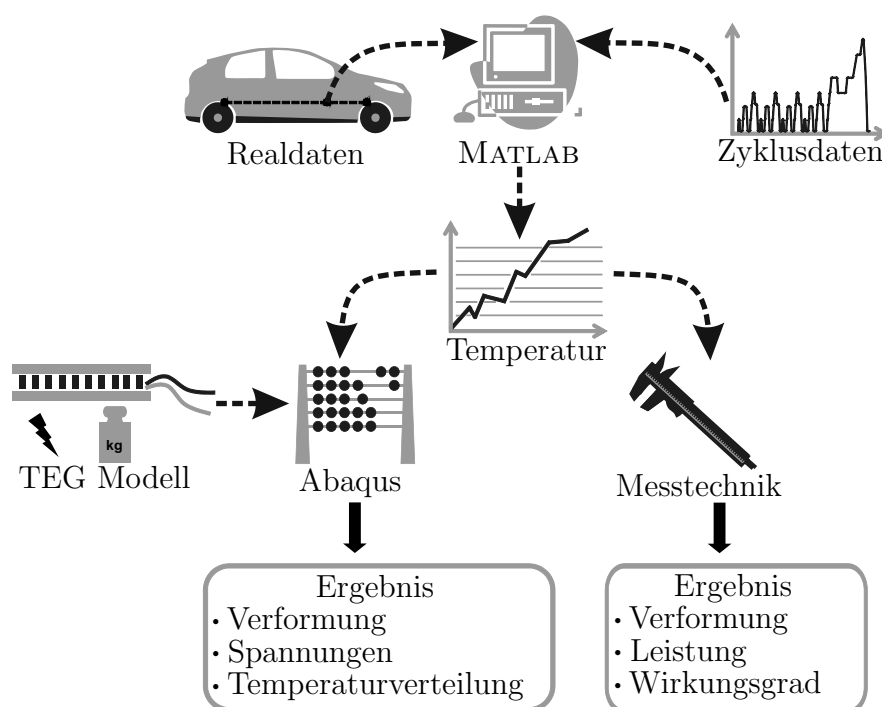


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung der Datengenerierung

auf Basis der ermittelten Temperaturen durchzuführen oder das erforderliche Temperaturprofil für das Messgerät bereitzustellen.

Die MATLAB-Simulation arbeitet im vorliegenden Fall mit einem generischen Mittelklassefahrzeugmodell, dessen Aufbau in Abbildung 4.2 verdeutlicht wird. Das betrachtete Fahrzeug entspricht in seinen Abmessungen und seinem Gewicht einem Opel Ampera und es ist eine verbrennungsmotorische und eine Hybridvariante<sup>1</sup> möglich. In beiden Fällen steht eine Antriebsleistung von etwa 100 kW zur Verfügung. Die Systemleistung setzt sich bei dem betrachteten Hybrid aus der Summe der Leistung des Verbrennungsmotors und der Leistung des Elektromotors zusammen.

Zur Ermittlung der benötigten Temperaturen aus den Geschwindigkeitsdaten wird ein Fahrermodell benötigt, das Daten zur Berechnung der Longitudinaldynamik enthält. Mit der Sollgeschwindigkeit als Vorgabe wird berechnet, wann gebremst oder beschleunigt werden muss. Weiterhin kann die Lateral­dynamik zur Ermittlung des Lenkeinsatzes, um die Sollspur zu halten, genutzt werden. Da dies für die Temperatur im Abgasstrang nicht von Bedeutung ist, wird die gesamte Lateral­dynamik vernachlässigt.

Fahrermodell

<sup>1</sup>Es handelt sich um einen seriellen Plugin-Hybrid mit einer elektrischen Reichweite von ca. 30 km

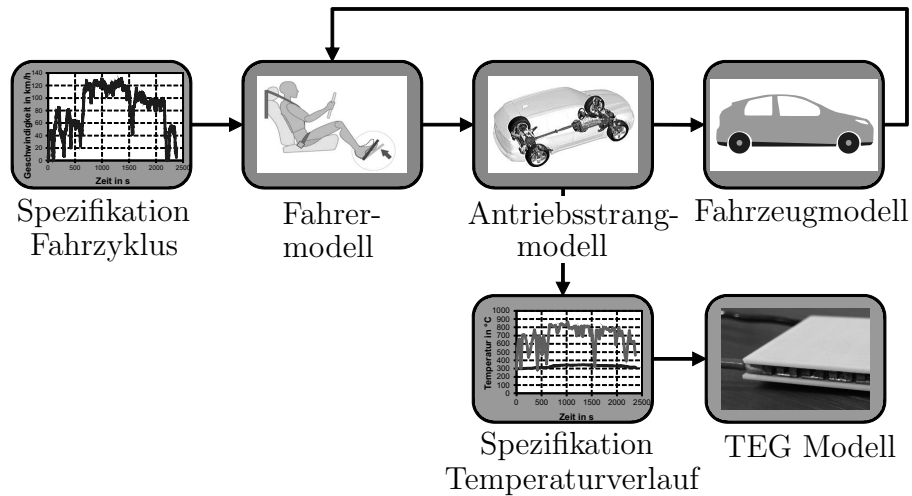


Abbildung 4.2: Aufbau des Simulationsmodells

Antriebsstrang-  
modell

Im nächsten Schritt wird ein Antriebsstrangmodell benötigt. Hierin sind Informationen über den Fahrzeugtyp, das Getriebe, den Motor und die Antriebsart enthalten. Mit diesen Informationen generiert das Antriebsstrangmodell bei einem gefahrenen Geschwindigkeitszyklus die hierfür notwendige mechanische Leistung sowie den daraus resultierenden Kraftstoffmassenstrom.

Fahrzeugmodell

Zuletzt werden über ein Fahrzeugmodell die angreifenden Kräfte und Fahrwiderstände berücksichtigt. Diese implizieren unter anderem die Kräfte durch Beschleunigungs- und Bremsvorgänge und Wind- und Fahrbahnwiderstände. Aus dem abgerufenen Motormoment und den Fahrwiderständen ergibt sich letztlich die Fahrzeugistgeschwindigkeit. Diese wird vom Fahrermodell überwacht und auf die Sollgeschwindigkeit geregelt. Die eingesetzten Fahrzeugmodelle werden ebenfalls in [79] verwendet und sind mit leichten Modifikationen für diese Arbeit übernommen worden.

Thermisches  
Modell

Die mechanische Leistung des Motors, die während des Fahrzyklus benötigt wird, dient ebenfalls als Eingang für ein thermisches Motormodell. Dieses Modell basiert auf dem thermischen Modell aus [33] und wird ebenfalls in [80] mit entsprechenden Vereinfachungen verwendet. Unter Verwendung eines Verbrauchskennfeldes wird der benötigte Kraftstoffmassenstrom ermittelt. Die im Kraftstoff gespeicherte Energie teilt sich nach der Verbrennung in die mechanische Abtriebsleistung und die thermische Energie auf. Die thermische Energie wiederum wird im thermischen Modell verwendet, um die relevanten Temperaturen zu berechnen. Um die Abgastemperatur  $T_{h,Ab}$  bestimmen zu können, muss der Energieeintrag ins Abgas bekannt sein. Weiterhin wird die Kühlwassertemperatur  $T_{k,Kühl}$  maßgeblich durch die Erwärmung des Motors beeinflusst. Der Energieeintrag ins Abgas sowie in den Motorblock ergeben zusammen die verfügbare thermische Energie im Brennraum. Mit

Einfluss der  
Umgebung

Hilfe eines Faktors, der von den Umgebungsbedingungen und dem Motorbetriebspunkt abhängt, wird die Gesamtenergie auf beide Pfade aufgeteilt. Anschließend erfolgt die Berechnung der Motortemperatur, der Abgastemperaturen  $T_{h,Ab}$  und der Kühlwassertemperatur  $T_{k,Kühl}$  auf Basis von Energiebilanzen. Das Zusammenwirken der verschiedenen Modelle ermöglicht die Berechnung der für den TEG benötigten Temperaturen für verschiedene Kfz und Strecken.

Für die Messungen werden der NEFZ sowie eigene, gefahrene Strecken, die Stadt-, Land- und Autobahnabschnitte enthalten, als Eingangswerte für die Simulation verwendet.<sup>2</sup> Außerdem werden ein herkömmlicher Verbrennungsmotor (Internal Combustion Engine Vehicle, ICEV) und ein Hybridmotor<sup>3</sup> (Plugin Hybrid Electric Vehicle, PHEV) gegenübergestellt. Die Verwendung eines Modells zur Bestimmung der Abgastemperaturen hat den großen Vorteil, dass verschiedene Fahrzeugkonfigurationen betrachtet werden können, ohne jeweils alle Temperaturen aufwendig messtechnisch zu erfassen. Ebenso können Änderungen schnell in die Analysen einfließen. Betrachtungen der TEG-Leistung in einem ICEV und PHEV können ebenfalls in [81] gefunden werden. Die Analyse eines PHEV ist im Zusammenhang mit einem TEG insbesondere deshalb von Interesse, da durch die mögliche Entkopplung von Straße und Verbrennungsmotor im Vergleich zum klassischen ICEV gänzlich andere Temperaturprofile entstehen können.

Gewählte  
Strecken und  
Antriebskonzepte

## 4.2 Betrachtung verschiedener Fahrzyklen

Die thermomechanische Belastung eines TEG hängt nicht nur von der Temperaturdifferenz zwischen kalter und heißer Seite ab, sondern auch von der Temperaturänderungsgeschwindigkeit und -häufigkeit; da es bei großen Temperaturgradienten verstärkt zu heterogenen Temperaturverteilungen im Modul selber kommt. Insgesamt ist die thermomechanische Belastung also vom Temperaturverlauf über der Zeit abhängig. Die Temperaturen und insbesondere die Temperaturänderungen im Abgas eines Kraftfahrzeugs werden maßgeblich durch Beschleunigungs- und Bremsvorgänge beeinflusst. Häufigkeit und Ausmaß solcher Vorgänge werden durch die Strecke (natürlich auch durch die Fahrweise des Fahrers) vorgegeben. Aus diesem Grund werden mit einem Testfahrzeug (Ford C-MAX Energi) Strecken in einer Stadt, über eine Landstraße und über die Autobahn im Herbst bei rund 15 °C Umgebungstemperatur befahren und während der Fahrt sämtliche relevanten Daten

Möglichkeiten  
der Simulation

<sup>2</sup>Der neuere und realistischere WLTP war zum Zeitpunkt der Durchführung der Messungen bereits definiert, wurde jedoch noch nicht verwendet, da der NEFZ noch immer der maßgebliche Zyklus für Messungen in Deutschland war.

<sup>3</sup>In Abschnitt 6.3 wird die Möglichkeit des TEG-Einsatzes in einem Hybrid betrachtet und bewertet.

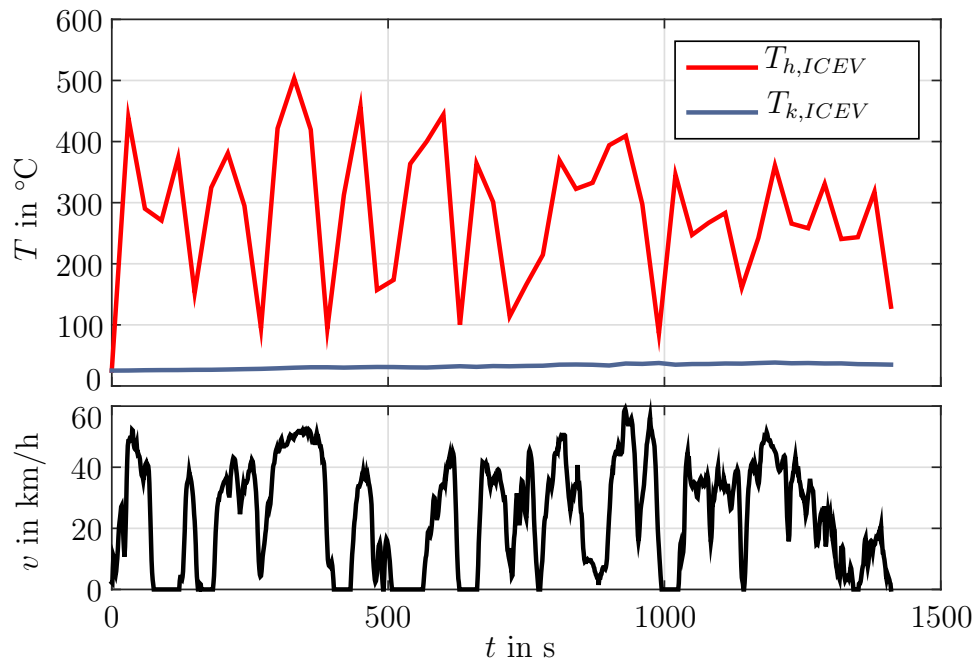


Abbildung 4.3: Temperaturverlauf des Stadtzyklus

aufgezeichnet. Diese dienen der MATLAB-Simulation anschließend als Eingangsgröße. Die Simulation lässt die Wahl verschiedener Motoren zu und eröffnet die Möglichkeit neben einem Verbrennungsmotor auch ein Hybridfahrzeug zu testen. Hierzu wird aus den gemessenen Realdaten mit Hilfe angepasster Modelle errechnet, wann der Verbrennungsmotor im Hybriden aktiv ist und welche Abgastemperaturen vorliegen. Die Schaltphasen zwischen Elektro- und Verbrennungsmotor können je nach gewählter Strategie variieren (vgl. Abschnitt 6.3.1).

#### 4.2.1 Temperaturprofil einer Stadtfahrt

Unter Verwendung der Simulation werden die Abgas- und Kühlwassertemperaturen für eine ca. 25-minütige Stadtfahrt berechnet. In Abbildung 4.3 ist zu erkennen, dass der Fahrtverlauf von vielen Brems- und Beschleunigungsvorgängen geprägt ist. Innerhalb der Fahrzeit schwanken die Geschwindigkeit und somit die Abgastemperaturen stark. Im Maximum werden im Abgasstrang etwa 500 °C erreicht, während der Kühlkreislauf über die gesamte Fahrzeit eine nahezu konstante Temperatur von 35 °C beibehält. Um später den Abgleich mit der Simulation zu ermöglichen und den zeitlichen Aufwand auf ein realisierbares Maß zu beschränken, wird die Anzahl der Datenpunkte der Temperaturen in dieser und den zwei folgenden Lastfällen reduziert, was zu einem leicht „abgehackten“ Verlauf führt. Auf die Betrachtung eines Hybridfahrzeugs wird an dieser Stelle verzichtet, da der Elektromotor während ei-



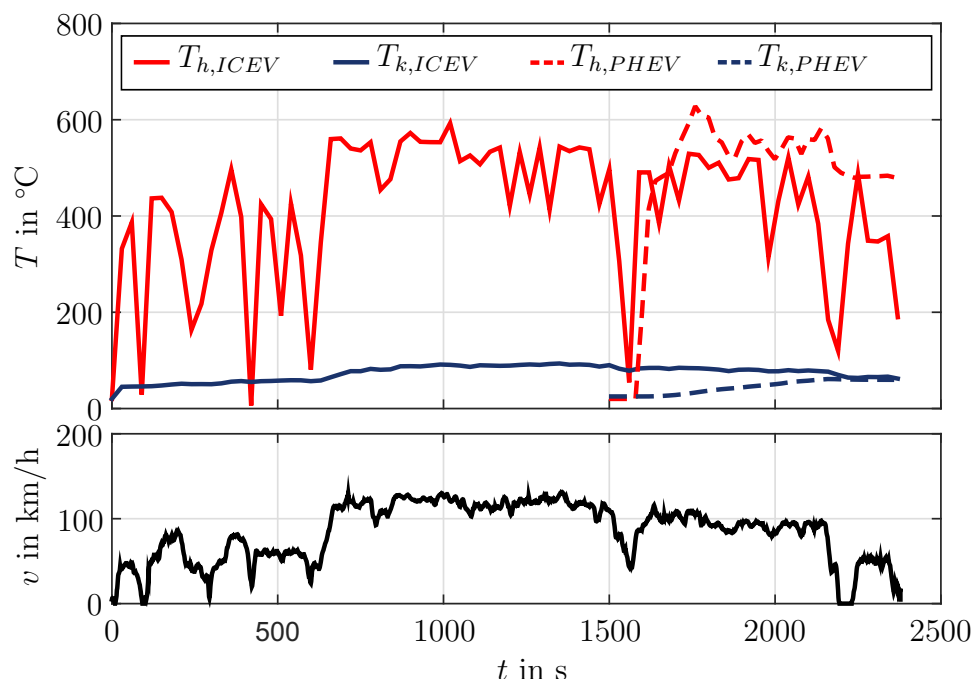


Abbildung 4.4: Temperaturverlauf der Landstraßenfahrt

ner kurzen Stadtfahrt für den Vortrieb sorgt und für den TEG somit keine heißen Abgase anfallen.

### 4.2.2 Temperaturprofil einer Landstraßenfahrt

Diese etwa 40-minütige Fahrt beinhaltet, neben den Strecken über die Landstraße, auch Teilabschnitte im Stadtverkehr und ebenso über die Autobahn. Das schlägt sich im Geschwindigkeitsverlauf und damit auch im Temperaturverlauf nieder. Die Verläufe der Temperaturen eines ICEV und eines PHEV sind Abbildung 4.4 zu entnehmen. Über eine Dauer von 1000 s liegen relativ konstante Temperaturen für den ICEV vor und die Abgastemperatur variiert in diesen Abschnitten um weniger als 100 K. Die maximal erreichte Temperatur im Abgas liegt bei rund 600 °C. Die Kühltemperatur steigt stärker an als bei der Stadtfahrt, bleibt jedoch über die gesamte Fahrt ebenfalls sehr gleichmäßig bei rund 80 °C. Da diese Fahrt verschiedene Straßenverkehrssituationen abbildet und somit ein breites Anwendungsspektrum darstellt, werden die Messungen mit den Temperaturen dieser Fahrt durchgeführt.

Konstante, aber höhere Temperaturen

Die Betrachtung der gleichen Strecke unter Einsatz eines seriellen Hybridfahrzeugs zeigt, dass nach rund 25 min erstmals der Verbrennungsmotor genutzt und somit

Hybrid: erhöhte Temperaturen

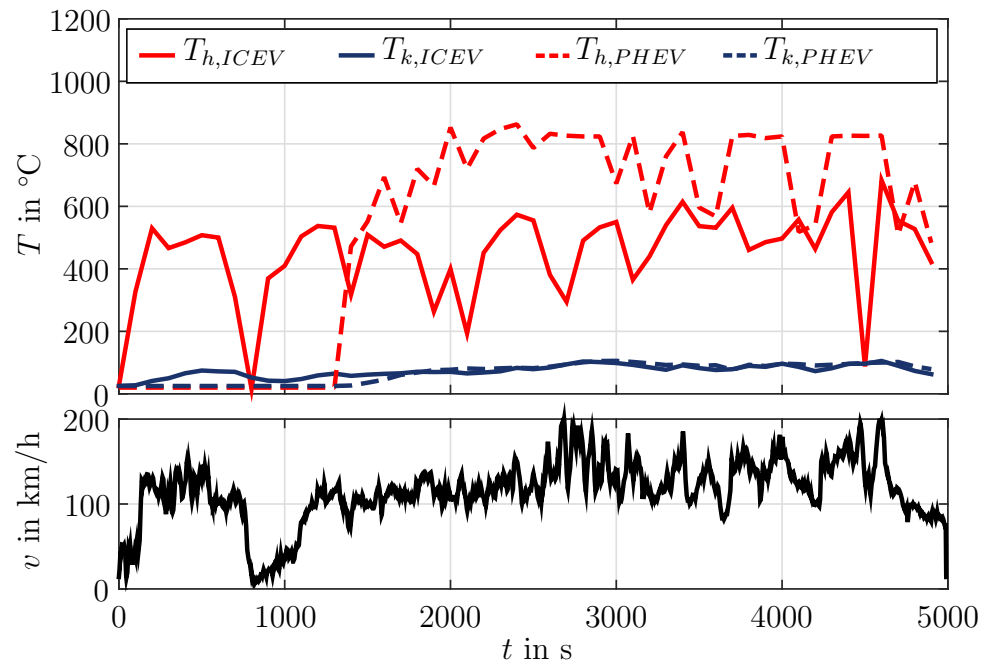


Abbildung 4.5: Temperaturverlauf der Autobahnfahrt

Abgas erzeugt wird, das dem TEG zur Verfügung gestellt werden kann. Die Abgastemperaturen liegen etwas über denen eines reinen Verbrennungsfahrzeugs und übersteigen kurzzeitig  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Wohingegen die Kühlkreislauftemperatur zunächst langsam ansteigt und dann ähnliche Werte wie ein ICEV erreicht.

### 4.2.3 Temperaturprofil einer Autobahnfahrt

Während der Autobahnfahrt werden über weite Strecken deutlich höhere Temperaturen als bei den Zyklen zuvor erreicht (vgl. Abbildung 4.5). Innerhalb der etwa 80-minütigen Fahrt steigt die Abgastemperatur auf fast  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  an. Die Kühlkreislauftemperatur erreicht langfristig gesehen konstante Werte von rund  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Im Vergleich zum ICEV erreicht der PHEV im Abgasstrang fast  $900\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Die Temperaturen im Kühlkreislauf hingegen entsprechend weitestgehend denen des reinen Verbrennungsfahrzeugs und liegen bei rund  $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Hybridfahrzeuge werden, durch die Möglichkeit, eine von den Reifen entkoppelte Betriebsstrategie zu nutzen, im Volllastpunkt des Verbrennungsmotors betrieben, da es sich dabei um den optimalen Betriebspunkt handelt. Aus diesem Grund liegt zwischen der Geschwindigkeit und der Verbrennerleistung (und somit indirekt auch der Abgastemperaturen) keine direkte Abhängigkeit vor.

Die hohen Temperaturen im Abgasstrang des Hybridfahrzeugs würden die eingesetzten TEG gefährden, da diese für den Einsatz in einem reinen Verbrennungs-

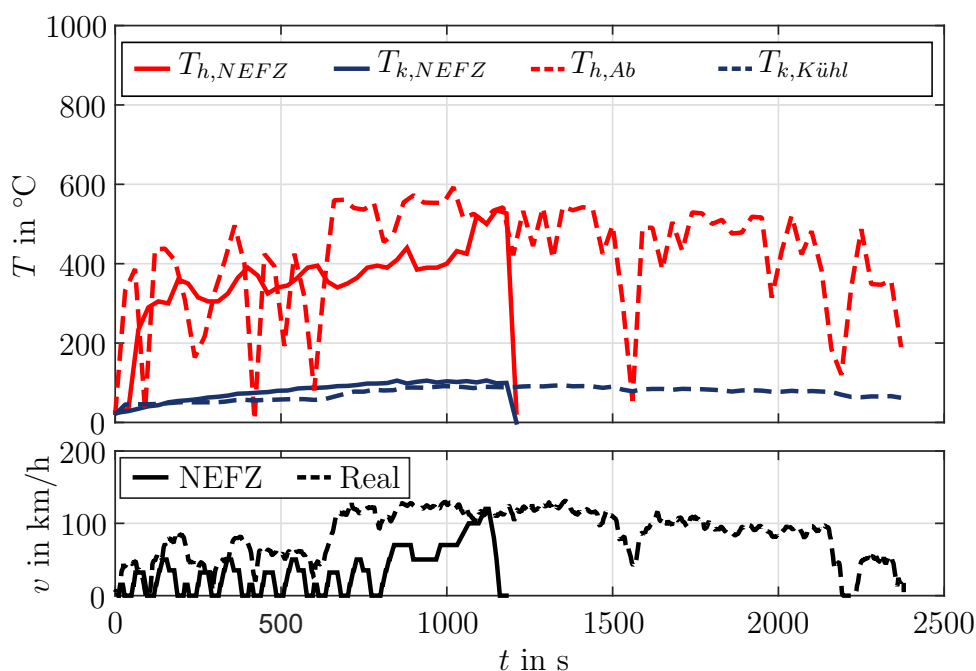


Abbildung 4.6: Vergleich der Temperaturverläufe des NEFZ und der Landstraßenfahrt, in Anlehnung an [82]

motor entwickelt wurden. An dieser Stelle muss entweder ein Bypass eingesetzt werden oder die verwendeten TEG müssen für diese hohen Temperaturen ausgelegt sein. Bei der Auswahl ist generell zu berücksichtigen, dass die tatsächlich am TEG anliegende Temperatur etwa 150 °C niedriger ist. Über den Wärmetauscher und verschiedene thermische Kontakte geht Energie verloren und reduziert die Oberflächentemperatur des TEG.

Folgen zu hoher Temperaturen

#### 4.2.4 Temperaturprofil des NEFZ

Der neue europäische Fahrzyklus stellt einen „zur Zulassung, zum Verkauf und zur Inbetriebnahme“ [83] vorgeschriebenen, idealisierten Zyklus dar. Für die Bewertung im Bereich der Effizienz diverser Komponenten oder des Gesamtfahrzeugs wird der NEFZ standardmäßig eingesetzt, um vergleichbare Ergebnisse zu erzeugen. So liefert der Verbrauch die für die Zulassung und Emissionsbewertung maßgeblichen Werte.

Standardzyklus

Dennoch wird der Einsatz und die Aussagekraft des Zyklus, nicht zuletzt wegen der aktuellen Debatten um Abgaswerte, kritisch diskutiert (siehe exemplarisch [84]), da er eine realistische Fahrt nur bedingt wiedergibt. Die kurze Dauer, die geringe Maximalgeschwindigkeit und die Durchführung auf dem Prüfstand sind nur einige wenige Kritikpunkte, die zu unrealistischen Abgaswerten führen. Häufig

Anwendungsferner Zyklus

werden von den Automobilherstellern zusätzlich eigene Kundenzyklen verwendet, um realitätsnahe Erkenntnisse zu gewinnen.

WLTC

Weiterhin soll im Jahr 2017 der Worldwide harmonized light duty test cycle (WLTC) eingeführt werden. Dieser ist im Vergleich zum NEFZ dynamischer, länger und wurde anhand weltweit gesammelter Fahrdaten entwickelt. Da die Automobilhersteller jedoch noch bis ins Jahr 2020 mit dem NEFZ nach alten Kriterien prüfen dürfen (siehe hierzu [82]), wird auf eine Berücksichtigung des WLTC verzichtet.

NEFZ nicht  
zweckdienlich

Abbildung 4.6 zeigt den zeitlichen Verlauf der Temperaturen und der Geschwindigkeit des NEFZ. Darin sind Abschnitte einer innerstädtischen und kurzzeitig einer außerstädtischen Fahrt enthalten, um verschiedene Situationen während einer Fahrt abzubilden. Im Vergleich zu den zuvor vorgestellten Fahrzyklen ist zu erkennen, dass der Geschwindigkeitsverlauf insgesamt geglättet erscheint. Weiterhin wird nur kurzfristig eine Geschwindigkeit von 120 km/h erreicht. Ebenso zeigt der Vergleich mit den real gefahrenen Strecken, dass bei diesen Fahrten deutlich mehr Temperaturwechsel auftreten als im NEFZ. Da aber die Lebensdauer vieler Materialien von der Anzahl der Lastwechsel abhängt, kann aus thermomechanischer Sicht auf Basis des NEFZ kein ausreichendes Ergebnis für die Modulbelastung gewonnen werden. Aus diesem Grund werden die durchgeführten Messungen nicht weiter diskutiert.

### 4.3 Auswahl der Prüflinge

Einsatz-  
temperaturen  
festlegen

In Abschnitt 2.6 wird gezeigt, dass die Temperatur und die Geometrie eines Körpers Einfluss auf die thermomechanischen Vorgänge haben. Verschiedene Temperaturen führen zu unterschiedlich starker Ausdehnung/Schrumpfung. Unterschiedliche Geometrien nehmen die so entstehenden Spannungen besser oder schlechter auf und beeinflussen letzten Endes auch die Lebensdauer eines Bauteils. Aus diesem Grund werden für die Untersuchungen zur thermomechanischen Beanspruchung thermoelektrischer Generatoren verschiedene Temperaturen und Module gewählt. Die untersuchten Module sind für verschiedene Temperaturbereiche ausgelegt (siehe Tabelle 4.1) und werden mit verschiedenen Temperaturprofilen entsprechend ihrer Einsatzbereiche belastet. Hierzu werden einerseits feste Temperaturschritte mit gleichen Abständen und andererseits reale Zyklen gewählt. Eine eingehende Beschreibung dieser Zyklen erfolgt in Abschnitt 4.2. Um außerdem vergleichbare Messungen der unterschiedlichen TEG durchführen zu können, werden die Temperaturen in ihrer Höhe an die zulässigen Einsatztemperaturen der einzelnen Module angepasst.

Abmessungen in mm	Schenkelgeometrie	Temperaturbereich in °C
40x40	Quader	200
40x40	Zylinder	200
50x30	Quader	600
60x45	Quader	600

Tabelle 4.1: Untersuchte thermoelektrische Generatoren vers. Hersteller

Weiterhin kommen drei unterschiedliche Geometrien zum Einsatz; ein kommerziell erhältliches Standardmodul, ein Modul mit zylindrischen Schenkeln und ein speziell für den Einsatz im Kfz entwickeltes Hochtemperaturmodul. Das Hochtemperaturmodul ist in zwei Varianten verfügbar: ein gekapseltes Modul, das im Inneren ein Vakuum aufweist und ein unverkapseltes Modul. Bezugnehmend auf Abschnitt 2.4.2 können hier unter Umständen durch die unterschiedliche Wärmeübertragung voneinander abweichende Ergebnisse gemessen werden. Die Wahl der Module ist durch die mangelhafte Verfügbarkeit begrenzt. Dennoch stellen die ausgewählten Prüflinge einen guten Querschnitt des derzeitigen TEG-Angebots dar.

Geometrieauswahl



---

# Analyse elektrischer und thermomechanischer Eigenschaften

---

Die Analyse der TEG ist in einen elektrischen und einen mechanischen Teil gegliedert. Der erste Teil umfasst die Charakterisierungsmessungen mit dem Ziel eine Aussage über die rein elektrische Leistungsfähigkeit des Moduls treffen zu können. Dabei werden sowohl feste Temperaturschritte, als auch Zyklusmessungen berücksichtigt. Im zweiten Teil wird der Schwerpunkt auf die thermomechanische Belastung eines TEG gelegt. Die Ergebnisse verschiedener Verformungsmessungen und die Simulationsergebnisse werden dargestellt. Basis der durchgeführten Messungen sind realistische Temperaturprofile von Kfz-Fahrten.

## 5.1 TEG-Charakterisierung bei konstanter Belastung

Zur Charakterisierung eines TEG ist die Bestimmung der generierten Leistung und des Modulwirkungsgrads unerlässlich. Wie in Abschnitt 4.1 beschrieben, wird hierzu zunächst der Innenwiderstand eines Moduls gemessen. Im späteren Betrieb ist

es dann möglich, einen äußeren Widerstand zur Leistungsanpassung auf Basis der Ergebnisse dieser Messungen auszulegen. Bei einer Charakterisierung werden die maximal generierte Leistung und der Wirkungsgrad häufig über die Heißeitentemperatur des TEG aufgetragen. Dadurch sind die möglichen Einsatztemperaturen und der optimale Einsatzbereich zu erkennen.

### 5.1.1 Durchführung der Leistungsanpassung

Bestimmung des  
Innenwiderstands

Die Ergebnisse der in Abschnitt 4.1.1 beschriebenen Messungen zur Leistungsanpassung können dem Diagramm in Abbildung 5.1 entnommen werden. Hierzu wird das letzte Modul aus Tabelle 4.1 untersucht. Die Daten im Diagramm spiegeln das entsprechende Vorgehen zur Bestimmung des inneren Widerstands wider: für vier feste Temperaturschritte werden Widerstände zwischen 0 und  $10\ \Omega$  eingestellt und die generierte Leistung bei einer Kaltseitentemperatur von  $T_k \approx 90\ ^\circ\text{C}$  gemessen. Beim Erreichen einer Maximalleistung ist der äußere, eingestellte Widerstand genauso groß wie der Innenwiderstand des TEG (Widerstandsanpassung). Die Kurven im Diagramm zeigen deutlich, wie stark die Leistung mit dem Lastwiderstand variiert und wo sich ein Maximalwert ergibt. Der Innenwiderstand des untersuchten Moduls liegt zwischen  $0,77$  und  $0,95\ \Omega$ . Mit wachsender Temperatur steigt auch der Innenwiderstand leicht an. Die Ursache für diesen Anstieg liegt in der Materialzusammensetzung der Schenkel. Details hierzu können in Abschnitt 4.1.1 nachgelesen werden.

### 5.1.2 Maximale Leistung bei konstanter Belastung

Deutliche Tempe-  
raturabhängigkeit

Nach der erfolgreichen Bestimmung des Innenwiderstands wird dieser Wert für die nächste Messung als konstant angenommen und als fester Lastwiderstand im Messgerät eingestellt. Im vorliegenden Fall wird ein Widerstand von  $0,86\ \Omega$  eingestellt. Zur Ermittlung der maximalen Leistung werden auf der heißen Seite erneut diskrete Temperaturschritte, angepasst an das jeweilige Modul, angefahren und die Leistung  $P_{TEG}$  und die Spannung  $U_{AB}$  gemessen. Die Temperatur des Umwälzkühlers wird so eingestellt, dass die kalte Seite des Moduls während der gesamten Messung eine möglichst konstante Temperatur aufweist. Bei der vorliegenden Messung wird die Kaltseitentemperatur auf  $90\ ^\circ\text{C}$  eingeregelt. Durch die schrittweise Erhöhung der Heizungstemperatur von  $200$  auf  $500\ ^\circ\text{C}$  um je  $100\ \text{K}$ , steigt auch die Temperaturdifferenz am TEG an. Abbildung 5.2 zeigt deutlich den damit einhergehenden Anstieg der generierten Leistung des TEG. Für die eingestellten Heißeitentemperaturen werden Leistungen von  $0,3$  bis etwa  $8\ \text{W}$  erreicht. Um die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen, werden pro Temperaturschritt drei Messungen



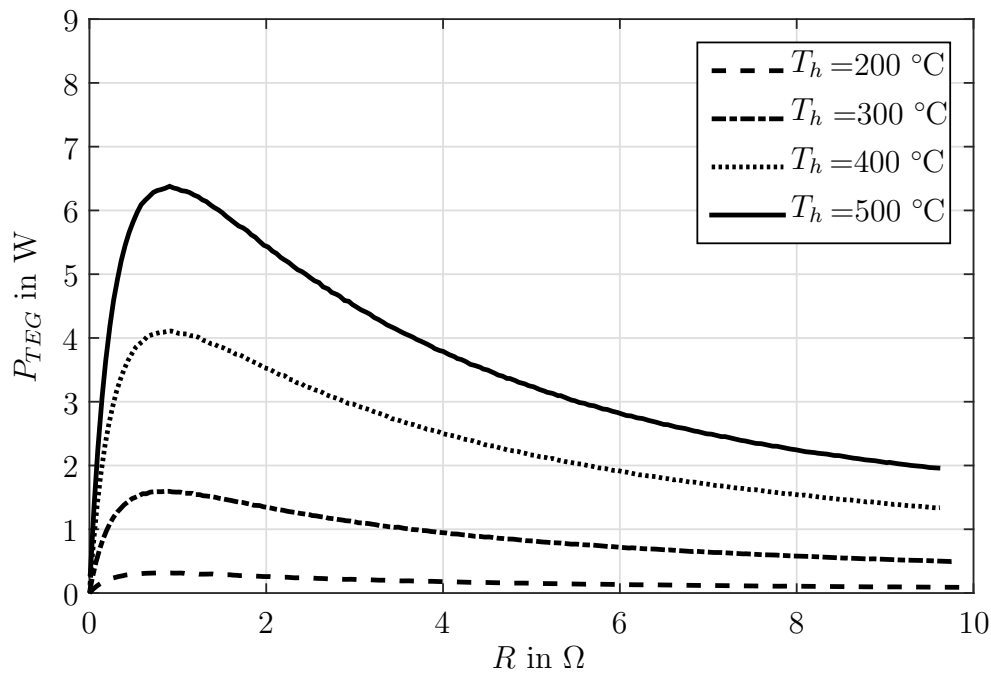


Abbildung 5.1: Die elektrische Leistung des TEG über dem veränderlichen Widerstand aufgetragen,  $T_k \approx 90^\circ\text{C}$

durchgeführt. Diese liegen dicht beieinander und weisen kaum Abweichungen auf. Lediglich beim letzten Temperaturschritt sind Unterschiede zwischen den Messwerten zu erkennen. Ein Wert zeigt eine sehr deutliche Abweichung zu höheren Leistungen (8 W bei  $500^\circ\text{C}$ ). Die Ursache für die Varianz der drei Werte ist der Umstand, dass die Heizung ihre Leistungsgrenze erreicht hat und der Regler keinen konstanten Wert mehr halten kann. Im oberen Temperatursegment reicht die Leistung der Heizung zwar aus, um die Solltemperaturen zu erreichen, aber eine exakte Regelung ist nicht mehr möglich (vgl. Abbildung 3.8). Somit wird die Heizung zum Erreichen der  $500^\circ\text{C}$  mit maximaler Leistung betrieben. Bedingt durch die schnelle Regelung kommt es zum Überschwingen und die Heizung schaltet beim Überschreiten der Solltemperatur ab. Bei niedrigeren Temperaturen regelt sich die Temperatur anschließend auf den Sollwert ein. Die Verluste bei hohen Temperaturen sorgen jedoch für ein rapides Abkühlen der Heizung, welche ab dem Unterschreiten des Sollwertes gleich wieder mit voller Leistung betrieben wird. Aus diesem Grund schwankt die Heizungstemperatur stärker ( $\pm 30\text{ K}$ ) und führt zu Abweichungen der Temperaturdifferenz am TEG. Diese Abweichungen wirken sich direkt auf die Seebeck-Spannung aus und verhindern es, drei Messungen mit gleichen Heizungstemperaturen durchzuführen.

Abweichung  
durch begrenzte  
Heizleistung

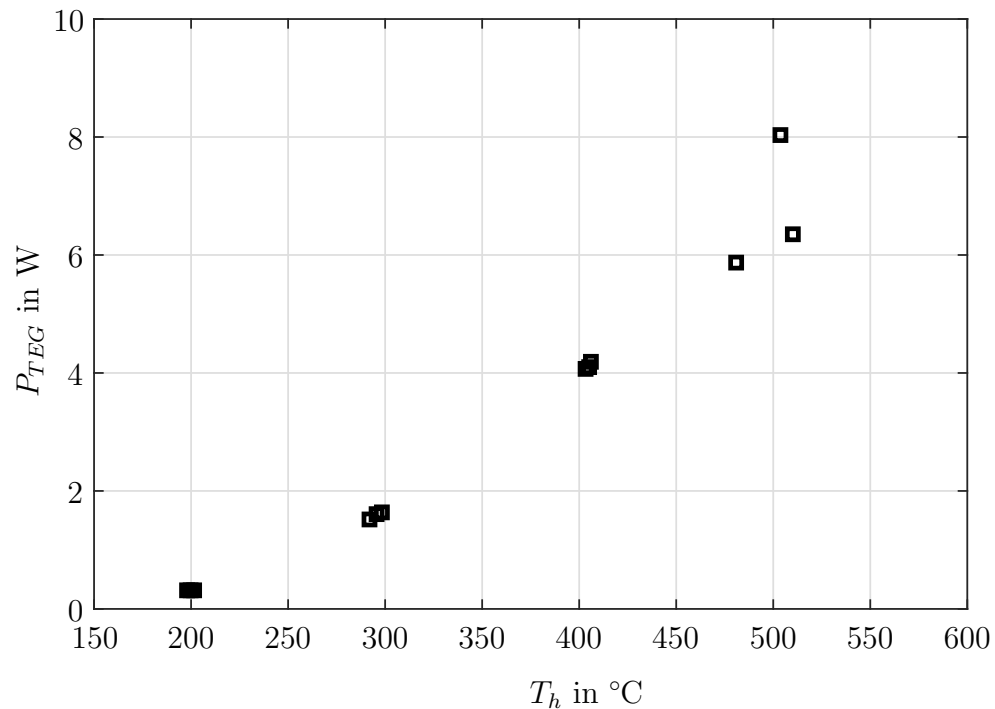


Abbildung 5.2: Die maximale Modulleistung, aufgetragen über die Heiseitentemperatur des TEG

### 5.1.3 Wirkungsgrad bei konstanter Belastung

Zur Berechnung des Wirkungsgrads werden in Abschnitt 3.3.1 die Gleichungen 3.6 und 3.7 eingeführt. Die Berechnung erfolgt jeweils über eine Leistungsbilanz der heißen und kalten Seite. Durch die Verwendung beider Formeln soll eine Art Selbstkontrolle der Messergebnisse möglich sein. Die Auswertung der Resultate zeigt jedoch, dass ein Vergleich nicht zielführend ist. Bei der Berechnung des Wirkungsgrads unter Verwendung der Eintrittsleistung können die auftretenden Verluste nicht mit ausreichender Genauigkeit berechnet werden und fallen durch die hohen Temperaturen stärker ins Gewicht als es bei einer genauen Messung der Verluste der Fall wäre. Dies führt zu einer erheblichen Abweichung des so ermittelten Wirkungsgrads. Ebenso ist die Berücksichtigung der Wärmeübergänge zwischen den einzelnen Komponenten sehr komplex und führt zu weiteren Ungenauigkeiten. Aus diesem Grund wird auf eine Berechnung des Wirkungsgrads über die Heizleistung verzichtet. Die Ergebnisse der Wirkungsgradberechnung über den Wärmeeintrag ins Kühlwasser zeigen hingegen zufriedenstellende Werte, die durch eine Vergleichsmessung in [85] bestätigt werden können. Als logische Konsequenz wird im weiteren Verlauf die Gleichung 3.7 genutzt, um den Modulwirkungsgrad zu berechnen.

Die Ergebnisse können Abbildung 5.3 entnommen werden: dort ist der ermittelte Wirkungsgrad in Abhängigkeit von der Temperatur der heißen Seite aufgetragen.

Wirkungsgrad-  
vergleich nicht  
zielführend

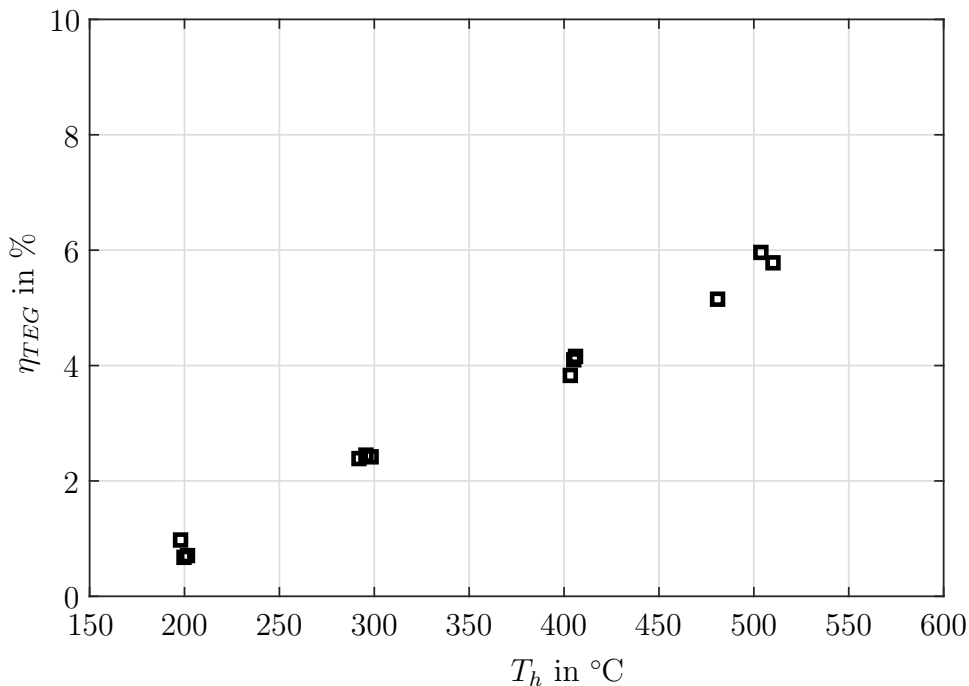


Abbildung 5.3: Modulwirkungsgrad bei konstanter Belastung

Für den Temperaturbereich zwischen 200 und 500  $^{\circ}\text{C}$  auf der heißen Seite werden für den Modulwirkungsgrad Werte von 0,7 bis 6 % erzielt. Erneut ist eine leichte Streuung der Ergebnisse für die drei Messungen bei höheren Temperaturen zu erkennen. Hier zeigt sich erneut der Einfluss der Heizleistungsgrenze und der Regelung. Schwankungen um den Sollwert führen zu einer Änderung der Temperaturdifferenz und im Anschluss zu einer Variation der drei Messergebnisse.

## 5.2 TEG-Charakterisierung bei wechselnder Belastung

Die zuvor dargestellten Ergebnisse entsprechen der gängigen Analyseart zur Charakterisierung thermoelektrischer Generatoren. Da die Module jedoch im realen Einsatz nicht konstant belastet werden, sondern einem ständig wechselnden Temperaturprofil ausgesetzt sind, wird die verwendete Messtechnik so ausgelegt, dass die Beaufschlagung mit einer dynamischen Last möglich ist. Wie in Abschnitt 4.1.3 beschrieben, werden aus Realfahrten Temperaturverläufe erzeugt und diese als Sollwerte für die Heizung und den Umwälzkühler des Messgeräts eingesetzt. Durch diese Herangehensweise liefern die Messungen realitätsnähere Ergebnisse und lassen bessere Prognosen über die Verwendbarkeit von TEG im Kfz zu. Für

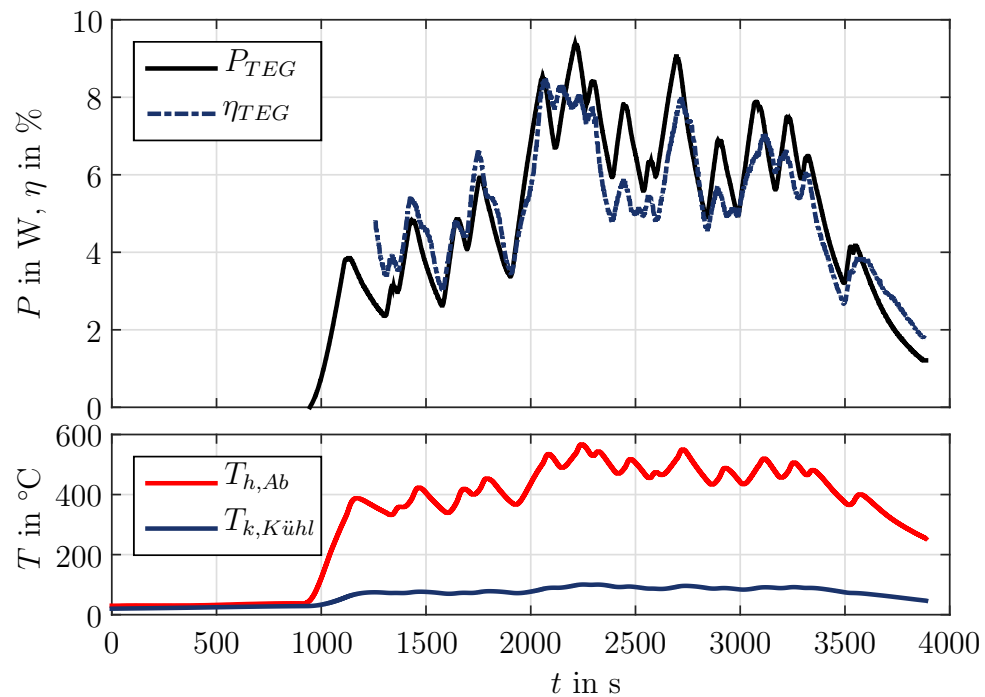


Abbildung 5.4: Leistung, Wirkungsgrad und Temperaturen in Abhängigkeit von der Zeit

die Untersuchung wird das gleiche Modul wie in Abschnitt 5.1 verwendet, um eine Vergleichbarkeit der Resultate zu gewährleisten. Aus diesem Grund wird auch der gleiche Innenwiderstand eingestellt, obwohl dieser durch die Temperaturabhängigkeit im Idealfall an die Temperaturen der Fahrzyklen angepasst werden müsste (siehe 4.1.1). Es folgt eine Gegenüberstellung der maximalen Leistung und des Wirkungsgrads für den Landstraßenzyklus aus Abschnitt 4.2.2. Dieser wird gewählt, weil er Teile einer Stadt- und einer Autobahnfahrt enthält und so ein breites Temperaturspektrum (und somit auch Belastungsspektrum) abdeckt. Ergänzend zu den Leistungs- und Wirkungsgraddaten sind die Temperaturen der heißen und der kalten Seite des TEG auf einer Sekundärachse abgebildet. Die Leistung und der Wirkungsgrad spiegeln deutlich den Verlauf der Abgastemperaturen wider und sind ein Indiz für die korrekte Funktionsweise der Messtechnik. Die Belastungssituation wird klar wiedergegeben und zeigt die Abhängigkeit des Wirkungsgrads von der Temperatur. Dennoch wird deutlich, dass noch andere Faktoren einen Einfluss haben, da teilweise bei gleichen Temperaturdifferenzen unterschiedliche Leistungen und ein anderer Wirkungsgrad gemessen werden. Aus diesem Grund werden die Leistung und der Wirkungsgrad nachfolgend über die Heißeitentemperatur aufgetragen.

Belastung wird  
klar  
wiedergegeben

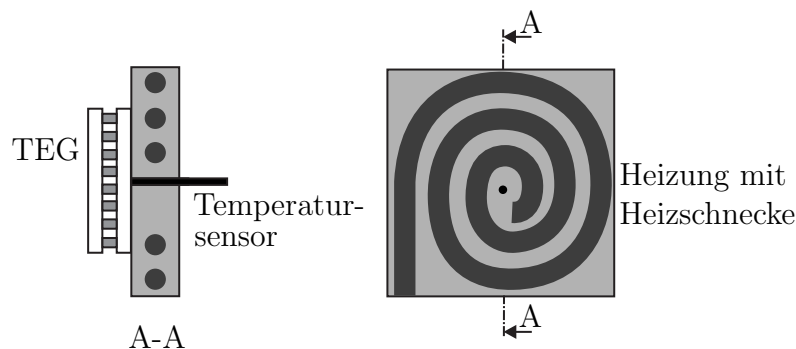


Abbildung 5.5: Position des Temperatursensors auf der heißen Seite

### 5.2.1 Maximale Leistung bei wechselnder Belastung

Der Verlauf der maximalen Leistung während der Landstraßenfahrt ist in Abbildung 5.6 dargestellt. Beginnend bei einer Abgastemperatur von  $30^\circ\text{C}$  und einer TEG-Leistung von  $0\text{ W}$  sind die einzelnen Messwerte in zeitlicher Reihenfolge miteinander verbunden. Die Werte in Abbildung 5.6 zeigen einen deutlichen Unterschied zu denen in Abbildung 5.2. Die vielen Beschleunigungs- und Bremsvorgänge führen zu stark wechselnden Temperaturen und zu einem schleifenförmigen Verlauf der Leistung über den gesamten Zyklus. Lediglich die Aufheiz- und Abkühlvorgänge vor Beginn eines Zyklus und beim Abkühlen nach einer Messung zeigen einen gleichmäßigen Verlauf; werden in der Analyse jedoch nicht betrachtet<sup>1</sup>. Im relevanten Messbereich erstreckt sich ein breites Band von Messwerten über einen Temperaturbereich von  $300$  bis etwa  $550^\circ\text{C}$ . Die gemessene Leistung variiert darüber zwischen  $2,5$  und  $9\text{ W}$ . Deutlich zu erkennen sind die bereits in Abschnitt 5.2 erwähnten unterschiedlichen Leistungswerte für eine Temperatur. Diese Hysterese kann mit der Position des Temperatursensors, der zur Bestimmung der Heißeittemperatur eingesetzt wird, erklärt werden.

Bedingte  
Vergleichbarkeit  
zu statischer  
Belastung

Der Sensor wird durch eine Bohrung im Mittelpunkt der Heizung geführt, sodass die Spitze auf der Oberfläche des TEG aufliegt. Beim Einschalten der Heizung wird diese durch die Heizschnecke erwärmt und die thermische Energie an den TEG weitergeleitet. Durch die Geometrie des Heizblocks (siehe Abbildung 5.5) erwärmt sich das Zentrum des Blocks jedoch langsamer als die Heizschnecke. Die Oberfläche der Heizung gibt die thermische Energie somit ungleichmäßig an die Oberfläche des TEG weiter. Aus diesem Grund hat die gemessene Temperatur des Sensors eine Phasenverschiebung zur tatsächlichen Heizungstemperatur und ist (während einer Aufheizphase) niedriger als diese. Die am TEG anliegende Temperatur ist während der Heizphasen bereits höher und ermöglicht die Generierung

Einfluss der  
Sensorposition

<sup>1</sup>Die bei  $0\text{ W}$  beginnenden Messwerte stellen die Aufheizphase dar.

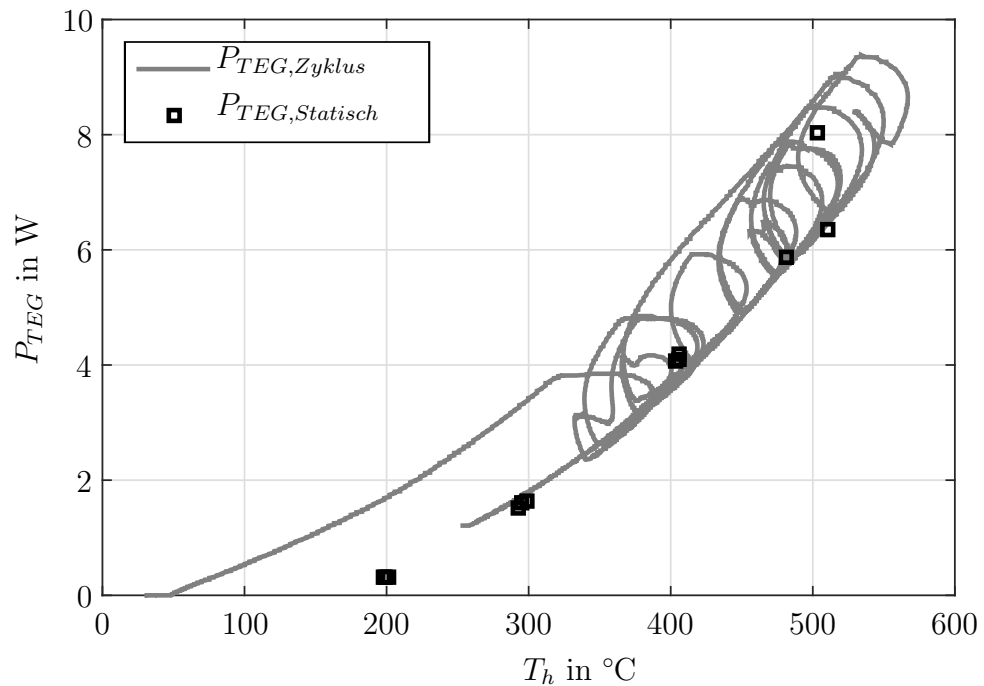


Abbildung 5.6: Generierte TEG-Leistung während der Landstraßenfahrt

einer höheren Spannung. Im Diagramm in Abbildung 5.6 ist das durch die höhere Leistung im Vergleich zu den Messergebnissen der quasistatischen Messung zu erkennen. Zum besseren Vergleich sind diese Werte ebenfalls in das Diagramm in Abbildung 5.6 übertragen worden. Sobald die Heizung beim Erreichen der Solltemperatur abschaltet, gleichen sich die Temperaturen zwischen dem Sensor und der TEG-/Heizungsfläche an. Im Diagramm wird das durch den oberen Bogen der Schleifen, die eine nahezu konstante Leistung bei steigender Temperatur abbilden, sichtbar. Sobald die Temperatur bei ausgeschalteter Heizung sinkt, fällt die Leistung ab und gibt den Verlauf der Datenpunkte der statischen Messung wieder. In diesem Bereich herrscht ein thermisches Gleichgewicht zwischen den Oberflächen und der Sensorspitze und es werden übereinstimmende Werte zwischen statischer und dynamischer Messung erzeugt. Das erneute Einschalten der Heizung führt zum Anstieg der Oberflächentemperatur und der Leistung und erneut zum Nachlaufen der Sensortemperatur. Die jetzt gemessenen Werte befinden sich wieder im nach oben verschobenen Bereich der Kurve.

Um die Auswertung anschaulicher zu gestalten, ist in Abbildung 5.7 ein Histogramm mit der relativen Häufigkeit, mit der verschiedene Leistungen erzielt werden, dargestellt. Auf der Abszisse sind die Leistungsklassen von 0 bis >9 W aufgetragen. Leistungen von 10 W oder mehr werden nicht erzielt, wie bereits aus dem Diagramm in Abbildung 5.6 hervorging. Das Histogramm zeigt, dass am häufigsten Leistungen zwischen 3-4 und 6-7 W generiert werden. Unter Berücksichtigung

Direkte  
Abhängigkeit  
vom Zyklus

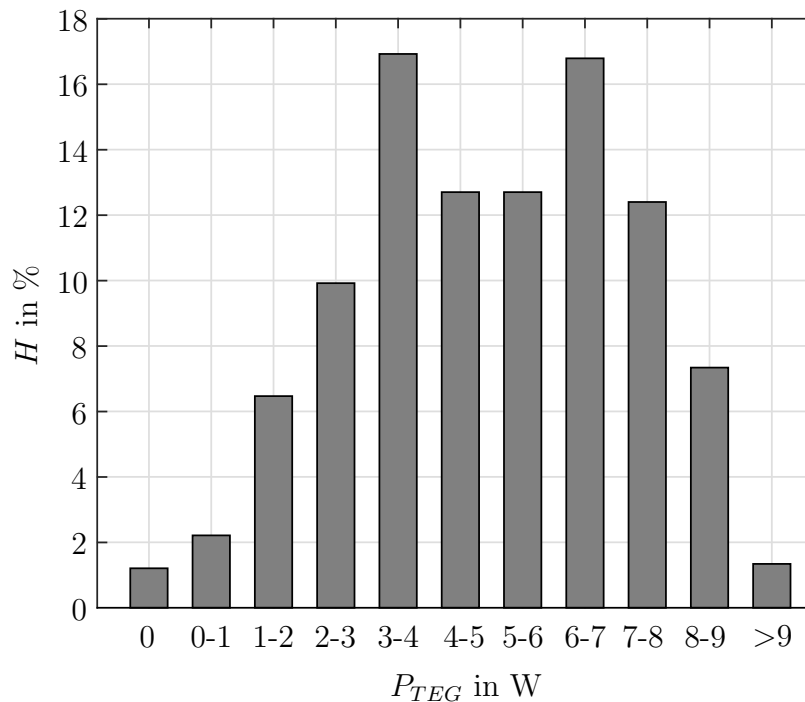


Abbildung 5.7: Histogramm der Häufigkeit verschiedener Leistungsklassen während der Landstraßenfahrt

des gefahrenen Zyklus' (siehe Abschnitt 4.4) wird deutlich, dass die selten erzielten Leistungen zwischen 4 und 6 W Geschwindigkeiten entsprechen, die ebenfalls seltener gefahren wurden. So kann die direkte Abhängigkeit der generierten Leistung von der gefahrenen Strecke und der vorherrschenden Temperatur gezeigt werden.

### 5.2.2 Wirkungsgrad bei wechselnder Belastung

Der Wirkungsgrad des TEG zeigt über den Zyklus ein noch ungleichmäßigeres Bild als der Verlauf der Leistung bei gleicher Belastung. Erneut wird der Temperaturbereich zwischen 300 und 550 °C betrachtet: der Wirkungsgrad nimmt für diesen Bereich über den gesamten Zyklus Werte von 2,5 bis 8,5 % an. Die Ursache für die Abweichungen werden im Abschnitt 5.2.1 detailliert erläutert. In Abbildung 5.8 sind zum Vergleich erneut die Werte der statischen Messung aufgetragen.

Die Auswertung des Fahrzyklus im Vergleich zur konstanten Belastung zeigt einerseits, dass im gewählten Zyklus etwas höhere Temperaturen und Temperaturdifferenzen erreicht werden als bei den statischen Messungen und folglich die generierte Leistung etwas höher ist. Dies kann durch die Erweiterung der statischen Temperaturschritte angepasst werden. Es wird andererseits auch deutlich, dass eine wirkliche Vorhersage der zu erwartenden Leistung nur bei Kenntnis der Belastung,

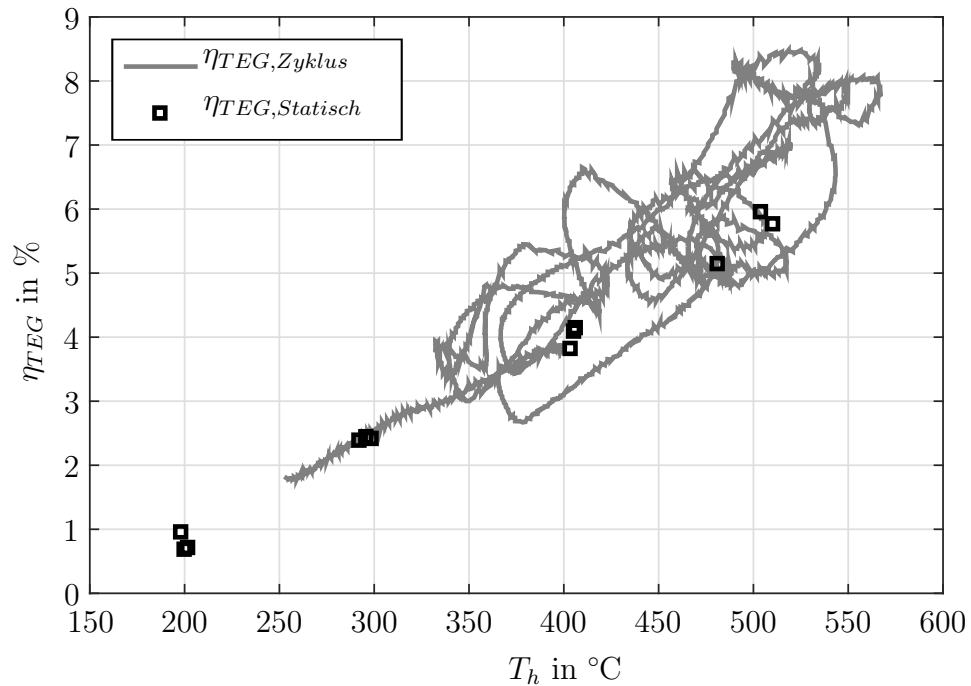


Abbildung 5.8: Verlauf des Wirkungsgrads während eines Zyklus

also des zeitlichen Wärmeeintrags, möglich ist. Weiterhin führt die Temperaturabhängigkeit der Gütezahl  $ZT$  bei stark variierenden Temperaturen über einen weiten Temperaturbereich zu Leistungseinbußen. Abbildung 2.9 in Abschnitt 2.4.3 zeigt deutlich, dass manche Materialien ein maximales  $ZT$  bei einer bestimmten Temperatur aufweisen. Die maximale Leistung kann in diesem Fall nur zeitweise, wenn die Abgastemperatur im für das Material optimalen Bereich liegt, generiert werden. Für Anwendungen mit einem breiten Temperaturbereich kann mit der Wahl meist nur eines thermoelektrischen Materials nur ein kleiner Temperaturbereich abgedeckt werden. Alternativ könnte die Kombination von Schenkeln aus verschiedenen Materialien, mit sich ergänzenden Temperaturbereichen, hilfreich sein. Hierbei müssen allerdings weiterhin die thermischen Eigenschaften der Materialien berücksichtigt werden. Simulationen dieser Art haben die Autoren in [86] unternommen und zeigen, dass die Kombination verschiedener Schenkelmateriale für Anwendungen im Kraftfahrzeug sinnvoll sein kann.

Weiter Temperaturbereich birgt Einschränkungen

### 5.3 Analyse des thermomechanischen Verhaltens

Das Hauptaugenmerk der durchgeführten Messungen liegt auf der Untersuchung der thermomechanischen Vorgänge im TEG während einer Belastungssituation.



Um ein ganzheitliches Bild zu erzeugen, werden die Messungen der Verformung und der auftretenden Kräfte des TEG im eingebauten Zustand um Speckle-Messungen bei freier Verformung und um FEM-Simulationen ergänzt. Erneut wird eine konstante und eine wechselnde Belastung analysiert. Die verwendeten Zyklustemperaturen bilden eigene Realfahrten und den NEFZ ab. Des Weiteren werden verschiedene Module vermessen, die sich in ihren äußeren Abmessungen und der Schenkelgeometrie unterscheiden.

### 5.3.1 FEM-Analyse eines TEG

Vorausgehend sei erwähnt, dass sich die Ergebnisse der FEM-Simulation auf die Landstraßenfahrt aus Abschnitt 4.2.2 beziehen und die Bilder der Auswertung Momentaufnahmen zu einem Zeitpunkt hoher Temperatur darstellen. Allgemein dient die Simulation zur ersten Abschätzung der auftretenden Spannungen und daraus folgend der Verformung, um zum Beispiel das Moduldesign in einer frühen Projektphase auf seine Belastbarkeit zu untersuchen. Um eine wirkliche Lebensdauer vorhersage auf Basis der FEM-Ergebnisse treffen zu können, müssten mögliche Schwachstellen, wie die Lötkontakte, detaillierter untersucht und ins FEM-Modell integriert werden.

Erste  
Abschätzung

Abbildung 5.9 zeigt den TEG bei einer Heißeitentemperatur von etwa 500 °C. Die Falschfarbendarstellung gibt einen Eindruck von der Verformung des TEG in z-Richtung. Um die Oberfläche des Moduls direkt betrachten zu können, wird die feste Platte auf der Oberseite, die die Anbindung an die Heizung darstellt, für die Ergebnispräsentation entfernt. Die Definition der Randbedingungen wird in Abschnitt 3.4.2 detailliert beschrieben und an dieser Stelle nicht erneut erläutert. Es ist klar zu erkennen, dass sich der TEG in seinem Zentrum am meisten verformt (zwischen 0,101 und 0,113 mm). Das Gesamtbild zeigt deutlich, dass sich die heiße Oberseite ausdehnt und dadurch aufwölbt. Die Ausdehnung der Unterseite ist relativ dazu wesentlich geringer, da auch die vorherrschenden Temperaturen niedriger sind. Eine Ausdehnung in negativer z-Richtung wird durch die Definition einer festen, unbeweglichen Platte unterbunden.

Verformung wird  
sichtbar

Es wird deutlich, dass ein TEG im Kfz somit bei wechselnder Belastung dauerhaft über einen langen Zeitraum eine schwingende Verformung zwischen Aufwölben und Entspannen ausführt. Da die Einbausituation eine freie Verformung verhindert, kommt es zu einer verstärkten, thermomechanischen Wechselbelastung des TEG (weitere Einbausituationen werden in [87] beschrieben). Eine Verformung dieser Art führt dazu, dass sich das Modul von der Wärmequelle und Wärmesenke abhebt und die thermische Anbindung nicht mehr gewährleistet ist. Das senkt den

Leistungseinbußen  
durch  
Verformung

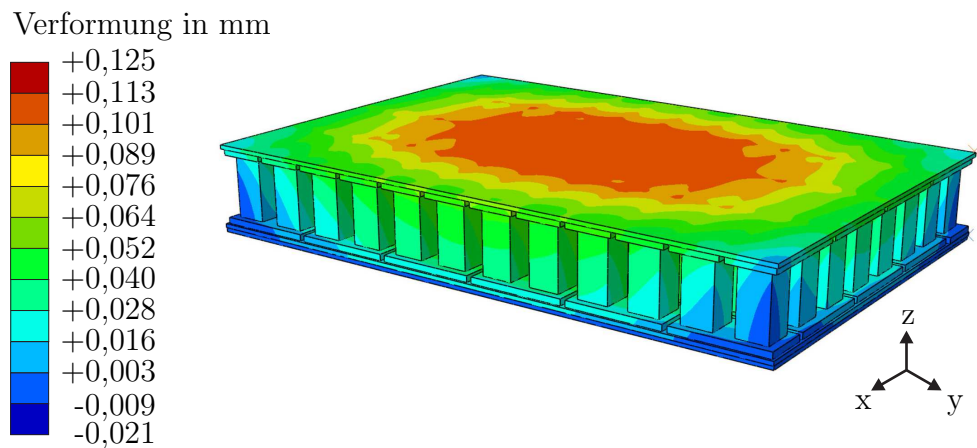


Abbildung 5.9: Verformung des TEG bei einer Heiseitentemperatur von 500 °C

Wärmestrom, der in den TEG strömt und führt zu einer Abnahme der generierten Leistung.

Die sichtbare Verformung des gesamten Moduls zeigt, dass besonders das spröde Schenkelmateriel stark beansprucht wird. In Abbildung 5.10 wird ersichtlich, welche Bereiche besonders gefährdet sind. Die Ecken der Schenkel weisen deutliche Spannungsspitzen auf, die das Material stark beanspruchen. Teilweise treten an einer einzigen Stirnfläche gleichzeitig Zug- und Druckbelastungen auf, deren Werte zwischen -12,5 und +1400 MPa liegen. Diese offensichtlichen Problemstellen müssen über ein entsprechendes Moduldesign berücksichtigt werden. Es handelt sich um eine mögliche Schwachstelle, die zum Bruch der Schenkel führen kann.

Mögliche  
Schwachstellen  
werden sichtbar

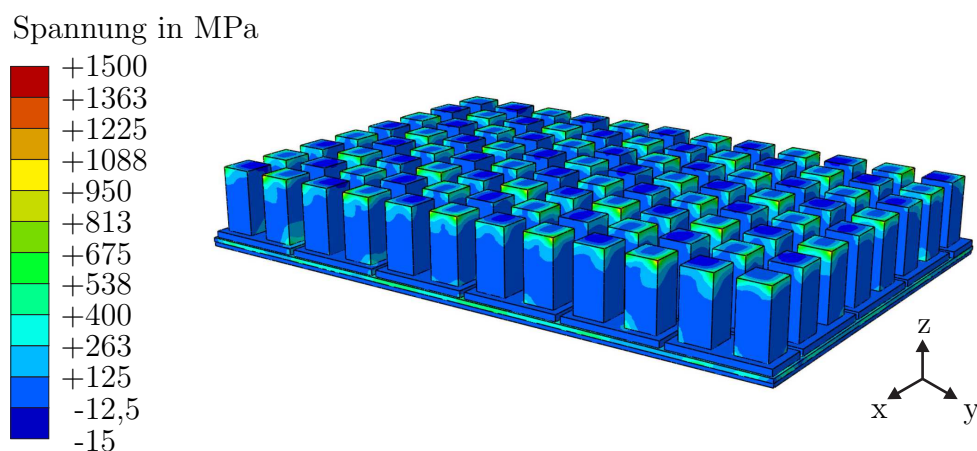


Abbildung 5.10: Auftretende Hauptspannungen im TEG bei 500 °C in z-Richtung

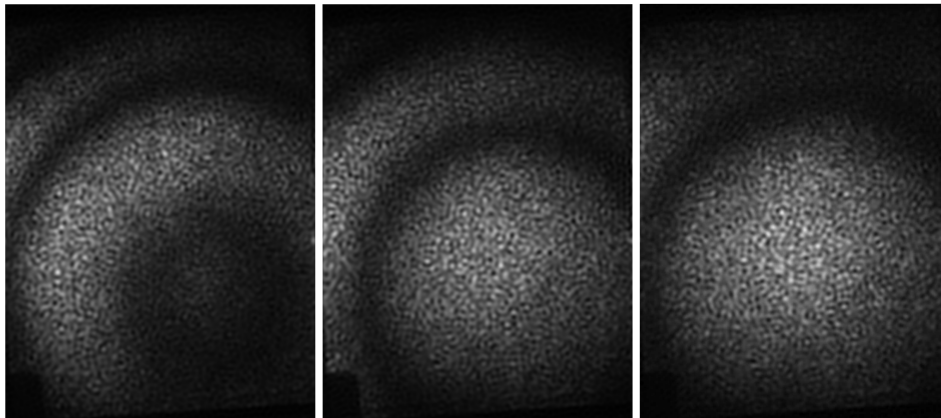


Abbildung 5.11: Darstellung des Interferenzmusters der TEG-Verformung mittels ESPI

### 5.3.2 Analyse der freien Verformung mittels ESPI

Das ESPI dient dazu die quasi-freie Verformung des TEG messtechnisch zu erfassen. Zur Untersuchung wird das thermoelektrische Modul als Peltier-Element betrieben und dazu an eine Stromquelle angeschlossen. Durch den Peltier-Effekt (vgl. Abschnitt 2.3) bildet sich am TEG ein Temperaturgefälle zwischen den beiden Keramikflächen aus und führt auf diese Weise zu unterschiedlich starken Verformungen der beiden Seiten. Die resultierende Verformung entspricht einer Formänderung durch eine externe Temperaturdifferenz und kann Abbildung 5.11 entnommen werden. Im ersten Bild sind drei dunkle Ringe zu erkennen, die bei einer Wellenlänge des Lasers von 780 nm eine Verschiebung um etwa 1  $\mu\text{m}$  bedeuten. Das mittlere Bild zeigt zwei Ringe, die sich im Vergleich zum Vorbild bewegt haben. Im rechten Bild ist ein letzter Ring zu sehen, der verschwindet, sobald ein stationärer Zustand erreicht ist. Durch die Insitu-Messung der Verformung stellen die Ringe die sich bewegende Oberfläche dar. Jede Bewegung bedeutet eine Änderung des Bildes zum vorigen Bild und somit eine messbare Differenz. Sobald der TEG einen stationären Zustand erreicht hat, treten keine weiteren Verformungen auf. Die Differenz zweier aufeinander folgender Bilder ist somit gleich Null und es sind keine Ringe mehr erkennbar. Im vorliegenden Fall wandern die Ringe zum Bildmittelpunkt und verschwinden dann. Dies spricht für eine Aufwölbung der Oberfläche und bestätigt somit die Ergebnisse der FEM-Analyse.

Interferenzmuster  
zeigt Aufwölbung

In Abbildung 5.12 wird deutlich, wie die Ringe in eine Verformungsdarstellung überführt werden. Jeder helle und jeder dunkle Ring entspricht jeweils einer Verformung der Größe  $\lambda_w/4$ . Die Größe der Verformung kann nicht direkt mit den Ergebnissen der Simulation oder den anderen Messergebnissen verglichen werden, da die Temperaturdifferenz zwischen Ober- und Unterseite wesentlich kleiner ist.

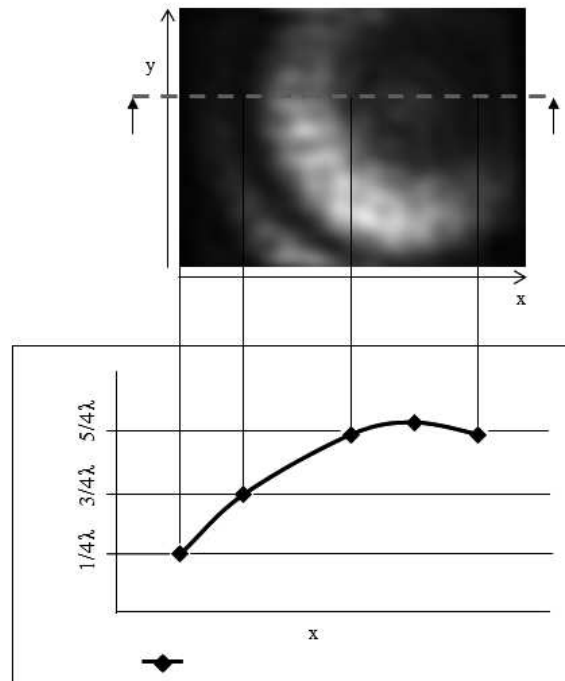


Abbildung 5.12: Überführung der Ringmuster in eine Verformungsdarstellung

Weiterhin wird ohne Wärmesenke in Form von beispielsweise Kühlrippen gemessen (diese würden die Temperaturen stabilisieren, weil über sie thermische Energie auf der kalten Seite abgeführt werden kann), um eine freie Verformung sicherzustellen. Um die Messung jedoch nicht zu beeinflussen, wurde kein Thermoelement auf der Oberfläche angebracht. Dennoch kann das grundsätzliche Verhalten der Oberfläche bewertet und verglichen werden. Bei der Messmethode ist zu beachten, dass die Bildaufnahmegeschwindigkeit und die Verformungsgeschwindigkeit durch den thermischen Einfluss aufeinander abgestimmt sind. Wenn eine schnelle Verformung des Prüflings stattfindet und der Zeitabstand zwischen der Aufnahme zweier Bilder wesentlich größer ist, können Ringe übersehen werden und den Absolutwert der Verformung verfälschen. Weitere Details zu dieser Analyse können in [88] nachgelesen werden.

Bildaufnahmegeschwindigkeit beachten

## 5.4 Messung der Verformung unter Last

Die in Abschnitt 3.3 vorgestellte Messtechnik ermöglicht die Verformungsmessung auf zwei unterschiedliche Arten:

- direkte Messung der Verformung und

- indirekte Messung über die Einspannkraft.

Bei der direkten Messung wird der aus Abschnitt 3.3.3 bekannte induktive Sensor verwendet. Dieser misst den Abstand zwischen der Wärmequelle und der Wärmesenke, der durch den TEG vorgegeben ist und dessen Dicke repräsentiert. Jede Änderung der TEG-Geometrie beeinflusst diesen Abstand und wird somit berücksichtigt. Dies bedeutet auch, dass eine Verschiebung der Heizung oder des Wärmetauschers, die die Referenzpunkte darstellen, die Messung leicht verfälscht. Die Ergebnisse zeigen, dass auch die Befestigung des Sensors ein stark temperaturabhängiges Verhalten aufweist und die Messung beeinflusst. Aus diesem Grund eignet sich diese Messmethode besser für statische Belastungen, bei denen zeitliche Änderungen nebensächlich sind und auf das Erreichen eines stationären Zustands gewartet werden kann. In der weiteren Ergebnisbetrachtung wird auf diese Variante aufgrund der Forderung nach einer dynamischen Messmethode nicht weiter eingegangen.

Induktiver Sensor  
besser für  
statische  
Analysen

Damit ein Teil der thermischen Energie überhaupt in Verformungsenergie umgewandelt werden kann, befindet sich eine Tellerfeder im Kraftfluss und ermöglicht die Verformung des TEG durch die Stauchung der Feder. Die Feder wird durch die Verformung des TEG mit der Kraft  $F_F$  um  $\Delta l$  zusammengedrückt. Unter Berücksichtigung der Vorspannkraft  $F_0$ , mit der die Komponenten zu Beginn fixiert werden, ergeben sich dann die Gleichungen

Tellerfeder  
ermöglicht  
Verformung

$$F_{mess} = F_0 + F_F \quad (5.1)$$

und

$$F_F = d\Delta l_{ges}. \quad (5.2)$$

$F_{mess}$	gemessenen Kraft der Verformung
$F_0$	Vorspannkraft
$F_F$	Federkraft
$d$	Federkonstante
$\Delta l_{ges}$	Längenänderung aller Körper/Komponenten

Auf diese Weise wird die Änderung  $\Delta l_{ges}$  der Ursprungslänge  $l_{0_{ges}}$  berechnet.

Im Gegensatz zum Einsatz des induktiven Sensor eignet sich die Messung mittels Kraftsensor sehr gut auch für dynamische Belastungen. In Abbildung 5.13

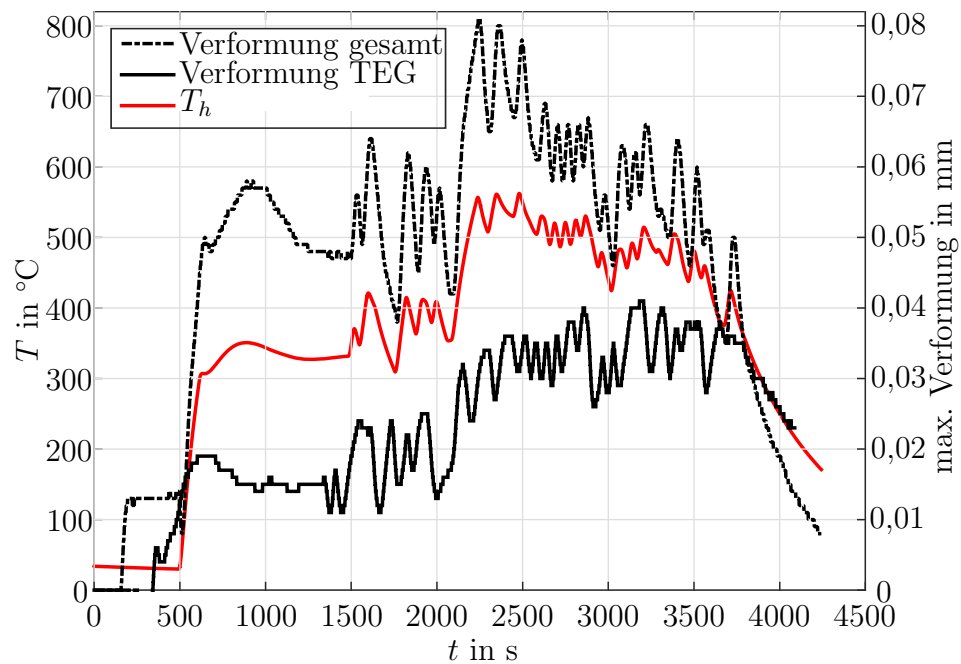


Abbildung 5.13: Verformung eines TEG während der Landstraßenfahrt

Kraftsensor für  
dynamische  
Messungen  
einsetzbar

ist zum einen die gesamte Verformung des TEG und der Komponenten und zum anderen die reine Verformung des TEG während der Landstraßenfahrt zu sehen. Mit Hilfe von Leermessungen und unter Verwendung einer linearen Regressionsfunktion kann der Einfluss der sonstigen Komponenten bei beliebigen Temperaturverläufen berechnet werden. Im Anschluss wird der gemessene Verlauf um den Einfluss der sonstigen Komponenten reduziert und eine Betrachtung der reinen TEG-Verformung möglich. Auf einer zweiten Vertikalachse ist die Heißeitentemperatur abgebildet. Die Gegenüberstellung zeigt deutlich, dass der TEG auf jede Schwankung der Temperatur sofort reagiert. Folglich belastet jeder Brems- und Beschleunigungsvorgang das Modul und trägt zur Alterung bei.

Messbare  
Verformung bei  
jedem  
Lastwechsel

Bei maximalen Temperaturen auf der heißen Seite des TEG von etwa 550 °C kommt es zu einer Ausdehnung der Komponenten um fast 40  $\mu\text{m}$ . Für die keramische Isolierung stellt die wechselnde Belastung nur ein Problem dar, wenn eine Art Dauerfestigkeitsgrenze überschritten wird. Die flache Steigung der Wöhlerkurve führt beim Überschreiten der Grenze zu Brüchen. Solange die auftretenden Belastungen diese Grenze jedoch nicht überschreiten, ist weder mit Brüchen noch mit einem Rissfortschritt zu rechnen und die Keramik hält der wechselnden Belastung stand. [89] Die Schenkel und die Anbindungstechnik zwischen Schenkeln, Lot und Isolierung werden jedoch mit jedem weiteren Temperaturwechsel erneut belastet. Besonders bei Stadtfahrten kann dies zu einer schnellen Schädigung des Moduls führen, ohne eine erwähnenswerte Leistung generiert zu haben, da die Abgastemperaturen verhältnismäßig gering bleiben.



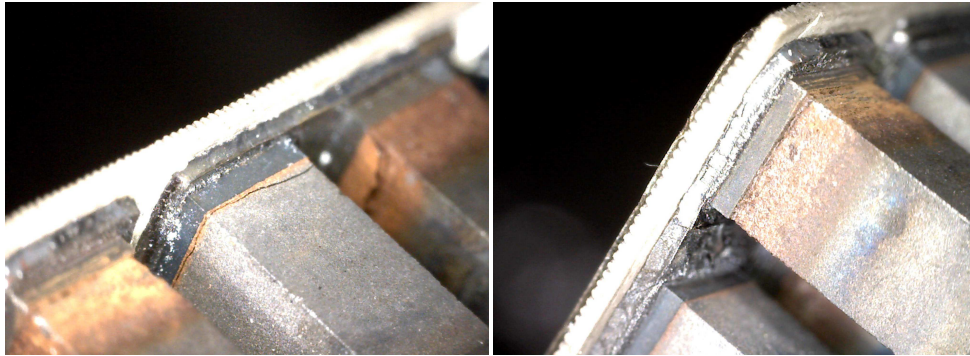


Abbildung 5.14: Beschädigungen am Schenkel und an der Leiterplatte nach wechselnder Belastung

Die Ergebnisse der Simulation und der Messung zeigen, dass jede Änderung der Temperatur direkt zu einer Änderung der Verformung und somit der Belastung des TEG führt. Das Material und die Verbindungen im TEG werden also dauerhaft durch die Ausdehnung und das Zusammenziehen der Strukturen belastet. Die spröden Halbleiterschlenkel weisen dabei an ihren Kanten besondere Spannungsspitzen auf. Es ist naheliegend, dass an diesen Stellen frühzeitig und vorrangig ein Defekt auftreten kann, der durch eine Geometrieänderung möglicherweise verhindert werden könnte. Die Überprüfung der Module im Anschluss an die Messungen hat in vielen Fällen einen unendlich großen Innenwiderstand ergeben. Die Ursache kann ein Defekt in einem Schenkel oder einer Leiterplatte sein. Weiterhin besteht die Möglichkeit, dass sich eine der Komponenten gelöst hat und im unverbauten Zustand kein elektrischer Kontakt mehr besteht. Ein Ausfall während der Messung wird nicht festgestellt, da der TEG durch die äußere Verspannung während des Betriebs zusammengedrückt wird. Eine optische Prüfung der betroffenen Bereiche bestätigt die Vermutung einer Schädigung. Das Foto auf der linken Seite von Abbildung 5.14 zeigt einen Schenkel in Nahaufnahme. Der Bruch unterhalb der Diffusionsbarriere ist deutlich zu erkennen. Auf Basis der Messungen und des Fotos kann nicht eindeutig geklärt werden, ob der Schenkel an dieser Stelle geschädigt wurde, weil das Materialgefüge durch das Aufbringen der Diffusionsbarriere verändert und unter Umständen vorgeschädigt wurde oder ob allein die thermomechanische Beanspruchung der Grund ist.

Sichtbare  
Schädigung der  
Module

Weiterhin ist zu erkennen, dass die Schenkel oxidiert sind. Der Grund hierfür sind anfängliche Testmessungen, die nicht im Vakuum stattfinden konnten. Die unterschiedliche Verfärbung der Schenkel verdeutlicht die verschiedenen Materialeigenschaften der p- und n-dotierten Schenkel.

Das rechte Foto zeigt einen Riss oder Bruch der Leiterplatte zwischen Schenkel und Isolierung. Es ist nicht zu erkennen, ob der Leiter vollständig gebrochen ist

### Verminderte Leistung

und somit kein elektrischer Kontakt mehr vorhanden ist oder der Riss nur einen Teil der Leiterplatte zerstört hat. In diesem Fall würde der Innenwiderstand stark ansteigen. Da im Verlauf der Messung weiterhin eine elektrische Spannung am TEG gemessen werden konnte, ist lediglich von einem Riss im Leiter auszugehen. Die Untersuchung der Module zeigt, dass bereits nach der Belastung der TEG mit wenigen Zyklen, rund 30 % der Module ausfielen oder eine verminderte Leistung generierten.



## KAPITEL 6

---

# Optimierter TEG-Einsatz

---

Dieses Kapitel zeigt Möglichkeiten, um den TEG aus thermomechanischer Sicht im Automobilumfeld nutzbarer zu machen. Bisher wurde deutlich, vor welche Herausforderungen Ingenieure gestellt werden, wenn TEG mit dem derzeitigen Design in den Abgasstrang eines Kfz integriert werden sollen. Eine mögliche Alternative kann eine Geometrieänderung darstellen: im FEM-Modell wird die Schenkelgeometrie angepasst und die Auswirkungen dessen untersucht. Weiterhin erfolgt die Untersuchung des Lastprofils eines Hybridfahrzeugs. Die Entkopplung von Rädern und Verbrennungsmotor verspricht einen weiteren Freiheitsgrad, der dazu genutzt werden kann, das Temperaturprofil für den Einsatz von TEG zu optimieren. Zuletzt werden kurz weitere alternative Einsatzgebiete und die resultierenden Belastungsfälle, zum Beispiel aus der Chemieindustrie, umrissen. Das Ziel hierbei sind gleichmäßigere Belastungen bei weiterhin hoher generierter Leistung.

## 6.1 Beispiele für zukünftige Anwendungen

Die Ergebnisse aus Kapitel 5 zeigen, dass bei der Integration von TEG in den Abgasstrang eines Kfz noch Optimierungspotenzial vorhanden ist. Dieses muss genutzt werden, bevor über einen Serieneinsatz nachgedacht wird. Einerseits können die Module anwendungsspezifischer ausgelegt werden, um die Belastungen während der Fahrt besser zu kompensieren. Hierbei sind Geometrien denkbar, die stärker belastet werden können oder eine mögliche Modulvorspannung, um die im Betrieb auftretenden Spannungen zu kompensieren. Andererseits können die zukünftigen Entwicklungen in der Materialforschung trotz der bekannten Schwierigkeiten dazu beitragen, dass die Module effizienter werden und den aufwendigen Einbau im Kraftfahrzeug rechtfertigen. Unter thermomechanischen Gesichtspunkten ist der beschriebene Einsatz im Kfz bei heutigem Stand jedoch unrealistisch. Stoßrichtungen, um einem Einsatz im Kfz näherzukommen oder Anwendungsbeispiele aus anderen Bereichen sind

- eine Geometrieoptimierung,
- der Einsatz im Hybrid mit einem thermomechanisch günstigerem Belastungsprofil oder
- Anwendungen mit konstanter Belastung.

Die letztgenannten Punkte können zukünftige Einsatzbereiche für thermoelektrische Generatoren im Hochtemperaturbereich darstellen.

## 6.2 Geometrieoptimierung

Die Ergebnisse der verschiedenen Analysen verdeutlichen, dass die Lebensdauer eines TEG durch die Belastung mit einem realistischen Zyklus deutlich herabgesetzt wird. Beim bisherigen Moduldesign stehen jedoch die Kosten und die elektrisch generierte Leistung im Vordergrund, während die Belastungssituation gar nicht oder kaum berücksichtigt wird. Durch den Einsatz von Simulationen können die Problemstellen bei wechselnder Belastung klar herausgearbeitet und gegebenenfalls zukünftig verringert werden. Die dargestellten Ergebnisse von Messungen und Simulationen zeigen deutlich, dass die betrachteten TEG eine hohe Ausfallwahrscheinlichkeit im Kfz hätten. Im untersuchten Fall stellt unter anderem die Geometrie der Schenkel eine Schwierigkeit dar. Beim ursprünglichen Design wurde vom Hersteller das optimale Verhältnis zwischen Länge und Querschnittsfläche ermittelt, um die maximale Leistung zu generieren. Ebenso wird ein möglichst

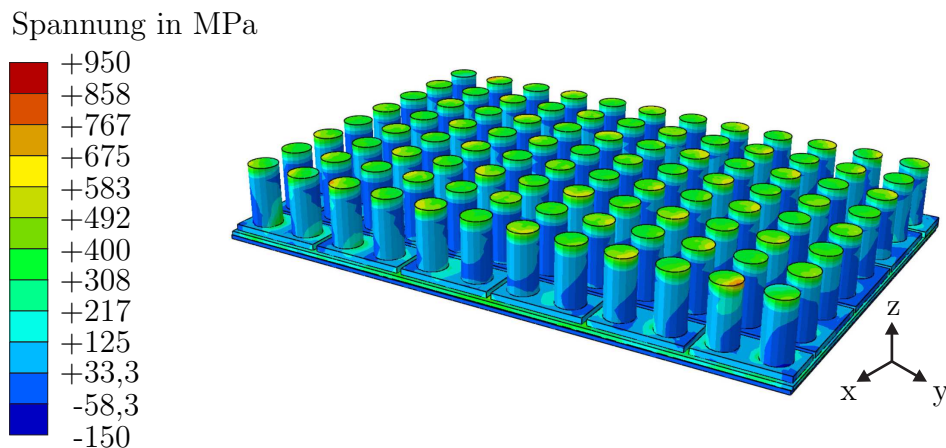


Abbildung 6.1: Auftretende Hauptspannungen im TEG mit zylindrischen Schenkeln bei 500 °C in z-Richtung

optimaler Materialeinsatz angestrebt, der die Auswahl der Geometrie ebenfalls beeinflusst. Eine geänderte Schenkelgeometrie ist in Abbildung 6.1 zu sehen. Hierbei wird der Fokus auf die Vermeidung von punktuellen Spitzenbelastungen gelegt und die Schenkel zylindrisch ausgeführt. Die maximalen Spannungen an den Stirnflächen variieren zwischen 300 und 850 MPa (zuvor zwischen -12,5 und +1400 MPa) und sind relativ gleichmäßig verteilt. Durch die fehlenden Ecken sind keine Spannungsspitzen an den äußeren Kanten zu erkennen. Die Ergebnisse deuten auf eine Verringerung der thermomechanischen Spannungen durch ein angepasstes Schenkeldesign hin. Im direkten Vergleich wird die Veränderung deutlich. Abbildung 6.2 zeigt den Verlauf der maximalen Spannung über der Zeit aufgetragen für die eckige und die zylindrische Schenkelgeometrie für ein Element der Stirnfläche. Die angepasste Geometrie hat die auftretenden Spannungen um die Hälfte reduziert. Auf diese Weise kann die Lebensdauer ggf. erhöht werden. Bereits diese relativ einfache Maßnahme zeigt, welches Potential aus thermomechanischer Sicht in einer Anpassung der Geometrie liegt. Zur Optimierung der Lebensdauer von TEG im Hochtemperaturbereich sollte daher neben der weiteren Materialentwicklung auch gezielt nach alternativen Geometrien gesucht werden.

Geometrie-  
anpassung  
verbessert Belas-  
tungssituation

## 6.3 Der TEG im Hybrid

Die Erkenntnisse aus den vorangegangenen Kapiteln zeigen, dass die wechselnde Belastung, die bei einem Kfz während der Fahrt entsteht, zu Schädigungen des TEG führen kann. Dennoch sind die hohen Temperaturen im Abgasstrang eine gute Möglichkeit mittels Thermoelektrik einen Teil der Abgasenergie zu rekuperieren. Eine gleichmäßigere Belastung bei ähnlich hohen Temperaturen verspricht

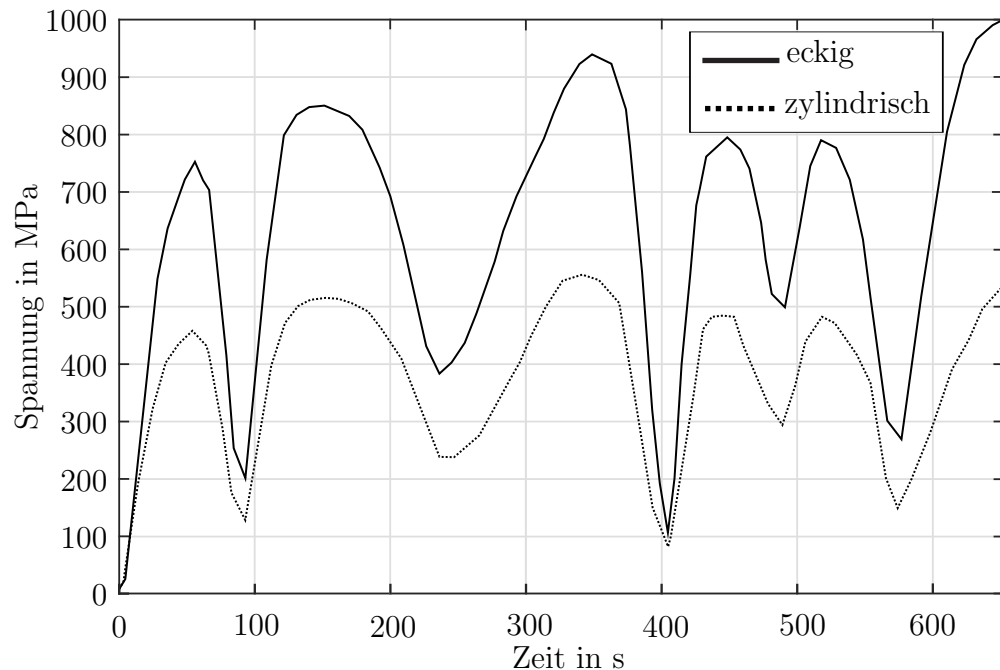


Abbildung 6.2: Auftretende Hauptspannungen während eines Fahrzyklus

weiterhin ein Plus an Energie bei gleichzeitiger Erhöhung der Lebensdauer. Hybridfahrzeuge können durch die mechanische Entkopplung des Verbrennungsmotors von den Rädern gleichmäßiger betrieben werden und produzieren folglich konstantere Abgastemperaturen. Da mit dem in Abschnitt 4.1.3 beschriebenen Modell verschiedene Fahrzeug- und Motorentypen modelliert werden können, werden für eine weitere Messung die Abgastemperaturen eines seriellen PHEV berechnet.

### 6.3.1 Erstellen einer angepassten Betriebsstrategie

Die Betriebsstrategie eines Hybridfahrzeugs wird mit dem Ziel ausgelegt, eine möglichst hohe Reichweite zu erzielen und die Batterie optimal zu nutzen. Aus diesem Grund wird bei Fahrtbeginn zunächst die geladene Batterie so weit entladen bis ein sehr geringer Ladezustand (State Of Charge, SOC) erreicht ist. In Abbildung 6.3 wird dieser Moment durch eine gepunktete Linie dargestellt. Der beschriebene Fahrmodus nennt sich Charge-Depleting-Mode und es handelt sich um eine rein elektrische Fahrt. Beim Unterschreiten der gepunkteten Linie wird die Batterie wieder aufgeladen, mit dem Ziel sie in einem festen Bereich zu halten. Dazu wechseln sich im sogenannten Charge-Sustaining-Mode Auf- und Entladevorgänge ab, um innerhalb des gewählten Fensters zu bleiben. Dieses Fenster ist in der Abbildung durch zwei gestrichelte Linien, die die gepunktete Linie umgeben, dargestellt. Im Charge-Sustaining-Mode wird der Verbrennungsmotor immer wieder aktiviert,

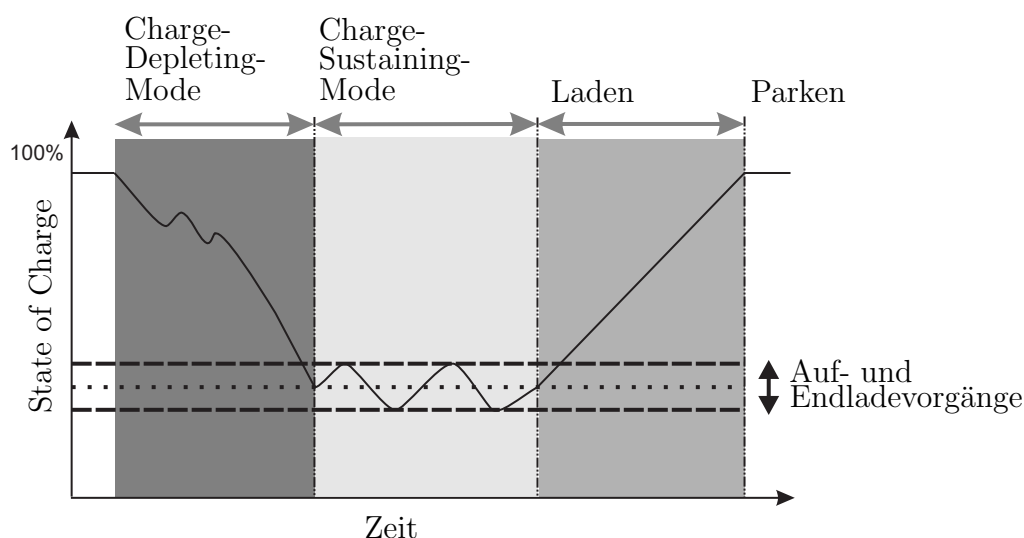


Abbildung 6.3: Ladezustände einer klassischen Betriebsstrategie, in Anlehnung an [90]

um die Batterie teilweise zu laden und im Anschluss, beim Umschalten auf den Elektromotor, direkt wieder zu entladen. Auf diese Weise wird ein Hybrid optimal betrieben und wird nach einer Fahrt bestenfalls mit einer leeren Batterie mit dem heimischen Stromnetz verbunden. Bis zur nächsten Fahrt kann die Batterie so mit günstigem Strom geladen werden und muss nicht den Umweg über die Wandlung von im Kraftstoff gebundener Energie, über mechanische, hin zu elektrischer Energie nehmen.

Während einer Fahrt mit einem Hybrid entstehen durch den abgeschalteten Verbrennungsmotor im Charge-Depleting-Mode keine Abgase. Erst während des Charge-Sustaining-Modes wird thermische Energie durch den Abgasstrang geleitet und könnte von einem TEG umgewandelt werden. Die Temperaturen würden jedoch stark schwanken, da nur beim kurzzeitigen Aufladen Abgase entstehen und dem TEG zugeführt werden können. Für einen TEG stellen aus elektrischer und besonders aus thermomechanischer Sicht gleichmäßige Temperaturen über lange Zeiträume den Optimalfall dar. Um dies zu erreichen, könnte die Betriebsstrategie für den TEG-Einsatz angepasst werden, um einen möglichst gleichmäßigen Temperaturverlauf zu erhalten. Hierzu müsste der Bereich im Charge-Sustaining-Mode, innerhalb dessen aufgeladen und entladen wird (somit „ladungserhaltend“), stark aufgeweitet werden. Für die Betrachtungen in dieser Arbeit erstreckt er sich über nahezu 60% des Batterieladezustands. An dieser Stelle wird weiterhin die Begrifflichkeit Charge-Sustaining-Mode verwendet, auch wenn die Batterie eigentlich aufgeladen wird. In Abbildung 6.4 ist der Ladezustand für eine angepasste Betriebsstrategie über die Zeit aufgetragen und der Unterschied zur klassischen Strategie wird deutlich. Während normalerweise etwa 20 % des SOC genutzt wer-

Auf TEG  
angepasste  
Betriebsstrategie

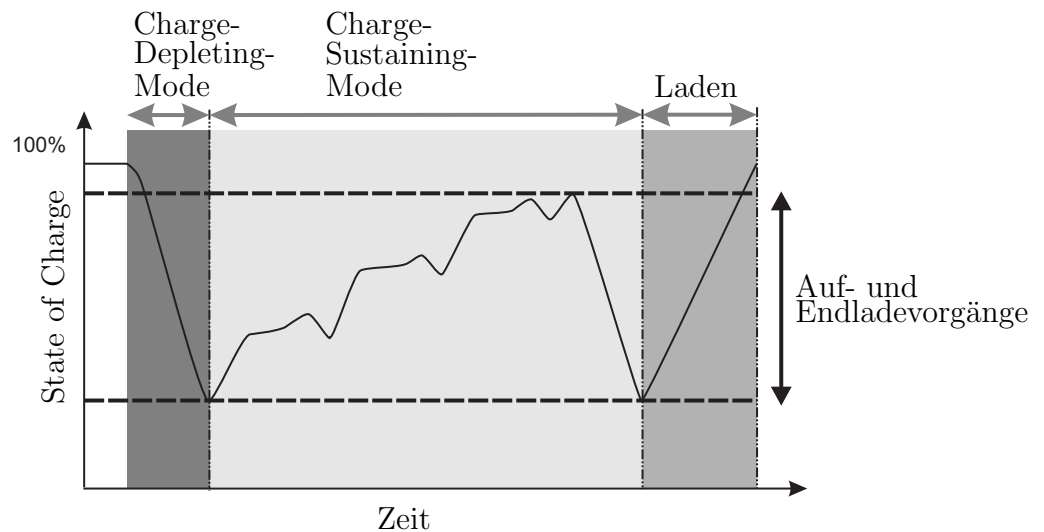


Abbildung 6.4: Ladezustände für eine angepasste Betriebsstrategie

den, kann jetzt über einen langen Zeitraum mit konstanter Temperatur gefahren werden, da ein großer Bereich des SOC beim Auf- und Entladen abgedeckt wird. Aus thermomechanischer Sicht wäre das eine optimierte Betriebsstrategie für einen TEG-Einsatz. Aus energetischer Sicht müssen an dieser Stelle jedoch die Auswirkungen auf das Gesamtsystem betrachtet werden.

### 6.3.2 Angepasster Temperaturverlauf

Das Ziel einer angepassten Betriebsstrategie ist ein gleichmäßigerer Temperaturverlauf für die heiße Seite des TEG. In Abbildung 6.5 wird deutlich, dass die Optimierung unter thermomechanischen Gesichtspunkten einen sehr konstanten Temperaturverlauf erzeugt. Über einen Zeitraum von etwa 50 Minuten bleibt die Abgastemperatur bei 720 °C. Diese konstanten Bedingungen sind optimal für den Einsatz von thermoelektrischen Generatoren. Allerdings führt die Anpassung der Betriebsstrategie dazu, dass die Batterie und der Verbrennungsmotor nicht mehr in den optimalen Auslegungspunkten betrieben werden. Dies kann dazu führen, dass die Batterie, mit dem Ziel gleichmäßige Temperaturen zu erhalten, vollständig aufgeladen ist, wenn das Kraftfahrzeug zum Stillstand kommt. Das bedeutet, dass die Batterie mit „teurer“ Energie vollständig aufgeladen wurde und die günstige elektrische Energie aus dem Stromnetz nicht nutzen kann. Es gilt zu untersuchen, ob die mit dem TEG generierte Leistung die Verluste der angepassten Betriebsstrategie kompensieren kann oder ob die Leistungsbilanz insgesamt negativ ausfällt.

Gleichmäßigerer  
Temperaturver-  
lauf

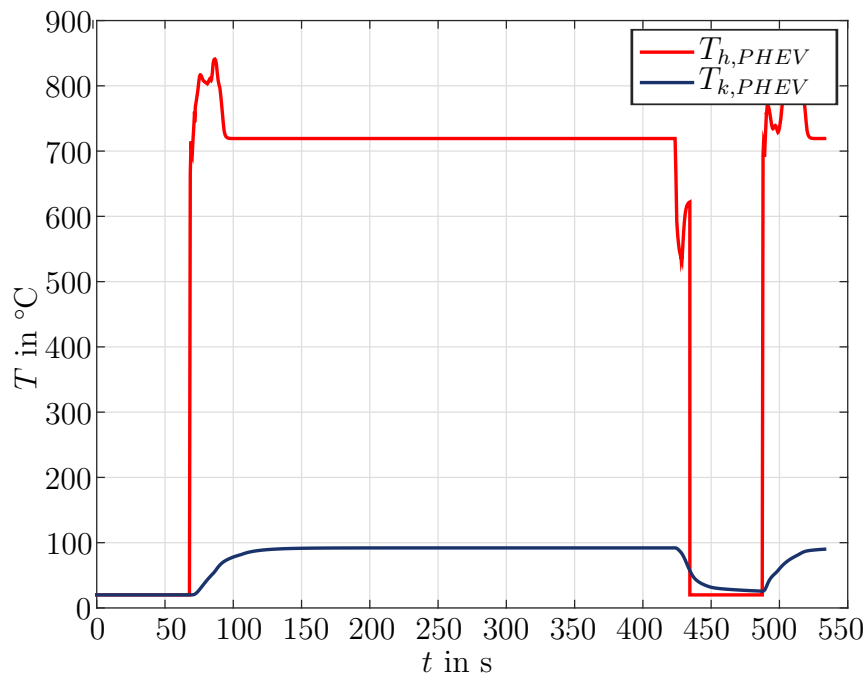


Abbildung 6.5: Temperaturverlauf des PHEV mit angepasster Betriebsstrategie

## 6.4 Alternative Belastungsfälle

Eine Möglichkeit, um einen TEG über lange Zeit mit konstanter Ausgangsleistung betreiben zu können, ist die Belastung mit gleichbleibenden Temperaturen. Beispielfhaft wird eine Anwendung aus der Chemieindustrie genauer betrachtet. Bei der regenerativen thermischen Oxidation (RTO) handelt es sich um ein Abluftreinigungsverfahren mit konstanten Temperaturen. Mit Kohlenwasserstoff verunreinigte Luft wird mittels Oxidation gereinigt. Hierzu werden Temperaturen von etwa 800 °C benötigt. Weiterhin erfolgt die Betrachtung eines Bootsmotors. Das Temperaturniveau ähnelt dem eines Kfz-Motors, weist jedoch einen deutlich konstanteren Verlauf auf.

### 6.4.1 Regenerative thermische Oxidation

Die Anlage zur Reinigung der Luft von Lösungsmitteln besteht aus einem dreigeteilten Regeneratorbehälter. Die drei Abschnitte, sogenannte Betten, sind mit wärmespeichernden Keramikkörpern gefüllt, die in Abbildung 6.6 als Gitterstruktur dargestellt werden. Über den Deckel, der durch die Integration eines Gasbrenners als Brennkammer dient, sind die drei Bereiche miteinander verbunden. Im unteren Bereich des Regeneratorbehälters befindet sich ein Rohrsystem, das Zu- und Abflüsse regelt. Jede Kammer besitzt einen Anschluss an einen Rohgaskanal.

3-Kammer-  
System

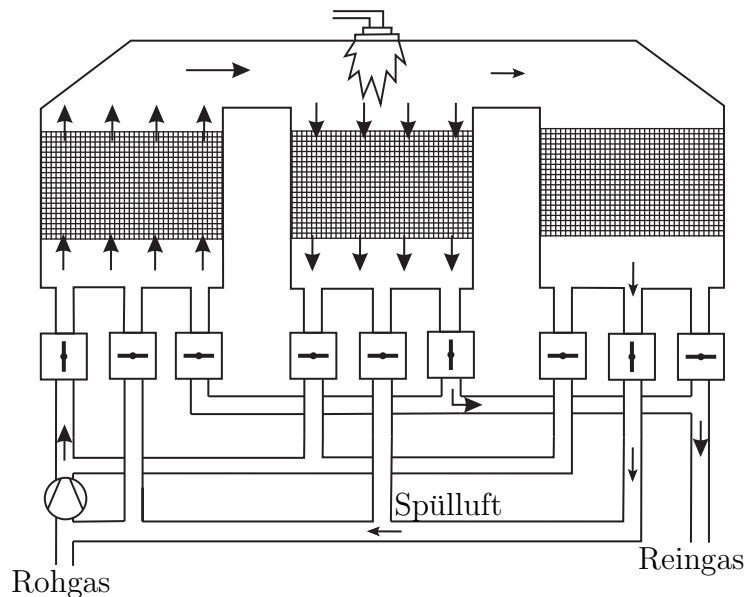


Abbildung 6.6: Schema einer regenerativen thermischen Oxidationsanlage

Weiterhin gibt es je einen Reinluftauslass und je einen Spülluftanschluss. Die drei Betten werden im Wechsel betrieben. Zu Beginn eines Reinigungsvorgangs wird die Temperatur der Anlage erhöht. Hierzu wird Luft durch das System geleitet und kontinuierlich vom Brenner erwärmt. Die Keramikkörper speichern die Wärme, um diese später für die Oxidation bereitstellen zu können. Im ersten Takt wird die zu reinigende Rohluft durch die Keramikkörper des ersten Betts geleitet. Die Keramikkörper haben eine Temperatur von  $780^{\circ}\text{C}$  und verbrennen bereits einen Teil des in der Luft enthaltenen Lösemittels. Beim Durchströmen des Brenners im Deckel kommt es zur Restoxidation der Schadstoffe bei  $820^{\circ}\text{C}$ . Ein Teil der Luft wird nun in den zweiten Behälter geleitet, um dort die Keramikkörper für den nächsten Takt vorzuwärmen. Beim Verlassen des zweiten Behälters hat die Reinluft eine Temperatur von etwa  $90^{\circ}\text{C}$ . Ein kleiner Teil der gereinigten Luft wird zum Spülen des dritten Behälters eingesetzt und danach wieder der Rohluft zugeführt. Dieser Spülvorgang ist notwendig, da nach jedem Reinigungsschritt Schadstoffe im Rohrleitungssystem und an den Keramikkörpern zurückbleiben und die zur Vorwärmung genutzte Reinluft wieder verunreinigen würden.

Im zweiten Takt dient das vorgewärmte, zweite Bett als Reinigungsbett für den ersten Oxidationsschritt. Von dort wird die Luft durch den Brenner in das dritte Bett geleitet, um dieses vorzuwärmen, während das erste Bett gespült wird. Der dritte und letzte Takt umfasst die Oxidation in Bett 3, die Vorwärmung in der ersten Kammer und den Spülvorgang der Keramikkörper in Bett 2.

Bei der Betrachtung des Prozesses fällt auf, dass die Temperaturen über lange Zeit sehr konstant sind. In Abbildung 6.7 sind die Temperaturen am Einlass in den



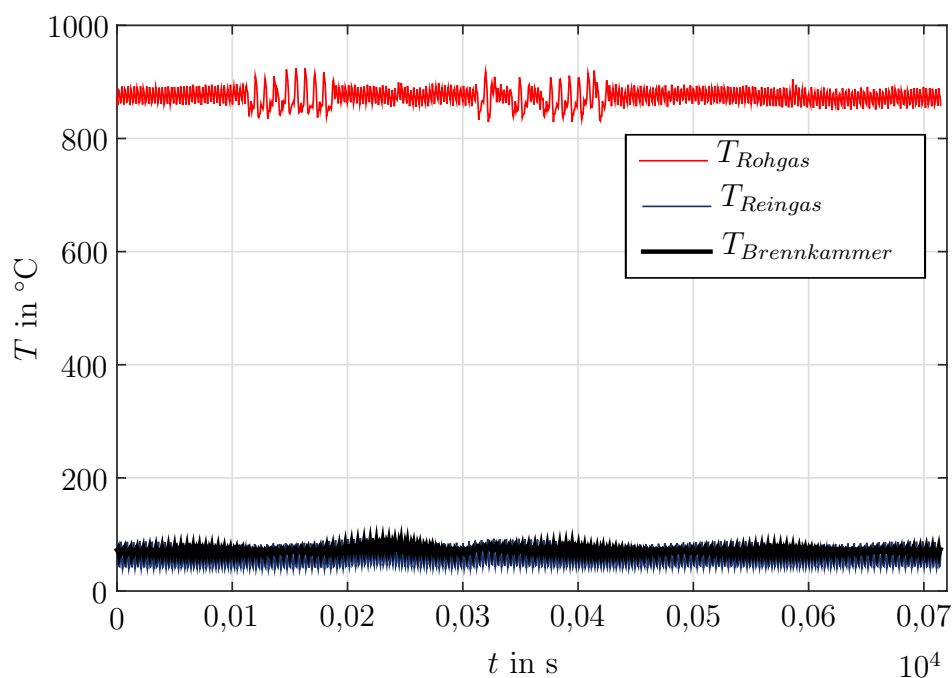


Abbildung 6.7: Temperaturverläufe einer RTO-Anlage

Regeneratorbehälter (Rohgas), in der Brennkammer und am Auslass (Reingas) für einen Tag abgebildet. Die Temperaturen am Einlass und in der Brennkammer schwanken im Normalfall um etwa 50 K, am Auslass sind es nur ungefähr 10 K (Schwankungen während der Fahrzyklen teilweise um mehrere 100 K). Diese konstanten Temperaturverläufe sind für einen Einsatz von TEG von Vorteil und führen nur zu geringen wechselnden thermomechanischen Belastungen. Um die thermische Energie zu nutzen, könnten Module in die Isolierung um die Brennkammer integriert werden. Somit ist eine Anbindung an die Wärmequelle sichergestellt. Weiterhin besteht die Möglichkeit das abgekühlte Reingas als Wärmesenke an der anderen Seite der TEG vorbeizuführen und so die benötigte Temperaturdifferenz bereitzustellen. Hierbei muss sichergestellt werden, dass das Temperaturniveau, das benötigt wird, um die Schadstoffe zu verbrennen, gehalten werden kann und der eigentliche Prozess durch die TEG nicht negativ beeinflusst wird.

Geeignete  
stationäre  
Anwendung

### 6.4.2 Ein Bootsmotor als mögliche Anwendung

Die Betrachtung eines Verbrennungsmotors in einem Kfz hat gezeigt, dass das Lastprofil die Lebensdauer eines TEG herabsetzt. Das Temperaturniveau bietet dennoch hohes Potenzial für eine TEG-Integration. Eine alternative Möglichkeit zum Einsatz von Hochtemperaturmodulen bieten Dieselmotoren, die auf Segelschiffen und Yachten eingesetzt werden. Je nach Motorauslastung werden Temperaturen

für die heiße Seite des TEG von 250 bis 500 °C erreicht [91]. Die Kühlung des TEG wird durch eine Seewasserkühlung realisiert, deren Temperaturen je nach Ort und Strömung zwischen 0 und 30 °C liegen. Folglich verspricht das Temperaturniveau bereits eine gute Leistungsausbeute. Der Vorteil aus thermomechanischer Sicht ist der konstante Betrieb eines Bootsmotors. Diese werden über lange Zeiträume bei konstanten Drehzahlen betrieben und weisen somit ebenfalls ein konstantes Temperaturprofil auf. Lediglich beim Manövrieren kommt es zu den oben angegebenen Schwankungen der Abgastemperaturen, welche jedoch nur einen geringen Prozentsatz der Gesamtbetriebszeit ausmachen. Weiterhin ist zu beachten, dass die Abgaswärme teilweise zur Brauchwassererwärmung eingesetzt wird. Durch die Integration von TEG sollte dieser Prozess nicht beeinflusst oder der Nutzen genau abgeschätzt werden. Durch thermoelektrische Generatoren kann die thermische Energie des Abgases in elektrische Energie gewandelt und so besser gespeichert werden. Die besseren Speichermöglichkeiten könnten gegebenenfalls den niedrigen Modulwirkungsgrad kompensieren und eine positive Systembilanz erzeugen.

## KAPITEL 7

---

### Fazit

---

Das Ziel der Arbeit war die Untersuchung der thermomechanischen Belastung von thermoelektrischen Generatoren in Kfz. Die wissenschaftlich geleistete Arbeit wird abschließend erläutert und ein Abgleich zwischen den anfänglichen Vorstellungen und Zielen und den letztendlich durchgeführten Analysen und erreichten Erkenntnissen gemacht. Final werden die Bereiche Messtechnik, Messergebnisse und Optimierungsansätze getrennt betrachtet und deren Kernaussagen zusammengefasst, um einen abschließenden Überblick zu ermöglichen.

### 7.1 Zusammenfassung der gewonnenen Erkenntnisse

Im Rahmen dieser Arbeit, die eine Untersuchung des thermomechanischen Verhaltens von TEG zum Ziel hat, wird ein Messgerät aufgebaut, dass die Messung der Modulverformung ermöglicht. Die Messtechnik ist in der Lage beliebige Fahrzyklen thermisch abzubilden und das zu untersuchende Modul einer realistischen Belastung auszusetzen. Aktuelle Messgeräte dienen der elektrischen Charakterisierung von thermoelektrischen Generatoren und belasten die Module mit gleichmäßigen

Geeignete  
Messtechnik

## Zwei Analyseverfahren

Temperaturprofilen. Die Darstellung einer wechselnden Belastung stellt eine klare Abgrenzung zu den bisherigen Messtechniken dar. Weiterhin ist eine thermomechanische Analyse der Module unter realistischer Last bisher nicht erfolgt. Ein Kraftsensor dient der indirekten Verformungsmessung über die Stauchung einer Feder und dient zur Messung hochdynamischer Fahrzyklen. Die Messung lässt Aussagen über die auftretende Temperaturwechselbelastung des TEG zu und dient einer Bewertung der Moduldauerfestigkeit. Durch die verwendete Feder sind verschiedene Vorspannungen und theoretisch eine geregelte Einspannung möglich. Ebenso können diverse Module unterschiedlicher Dicke untersucht werden.

## Modell für beliebige Belastungen

Weiterhin eröffnet die Kombination mit einem MATLAB-Fahrzeugmodell die Möglichkeit verschiedenste Motorentypen zu untersuchen und unterschiedliche Belastungssituationen zu erzeugen. Sowohl bekannte, standardisierte Zyklen (NEFZ, WLTP, HYZEM<sup>1</sup>), als auch gemessene Fahrdaten werden in Abgas- und Kühlkreislauftemperaturen umgerechnet und können dem Messgerät als Eingangsparameter dienen.

## Effizienzmessung weiterhin möglich

Zusätzlich bietet die aufgebaute Messtechnik neben der thermoelektrischen Charakterisierung auch die Möglichkeit eine realistische Belastung zu messen und so die untersuchte Anwendung zu bewerten. Die TEG können für eine bestimmte Einbausituation und individuelle thermische Belastung sowohl aus energetischer, als auch mechanischer Sicht, analysiert werden. Das Ziel einer thermoelektrischen und thermomechanischen Analyse wird folglich erreicht und liefert aussagekräftige Ergebnisse. Die Effizienzmessung könnte zukünftig noch weiter optimiert werden.

## Bewertung vom TEG im Kfz

Die Auswertung der Ergebnisse zeigt eindeutig, dass die untersuchten Module der gewählten Belastung auf Dauer nicht standhalten. Als Fahrzyklus dienen gemessene Daten einer Realfahrt über Landstraßen und Autobahnen. Der Zyklus dauert etwa 40 Minuten und die Module werden teilweise weniger als 10 Mal mit diesem belastet. Einige Module fallen dabei vollständig aus und es werden gebrochene Schenkel und Kontakte sichtbar. Der Sachverhalt verdeutlicht, dass die Lebensdauer der analysierten Module nicht mit der anderer Kfz-Komponenten vergleichbar ist. Insofern erscheint der Einbau von TEG mit der aktuellen Geometrie und den derzeit verfügbaren Materialien aus thermomechanischer Sicht nicht sinnvoll. Zu ähnlichen Ergebnissen bezüglich Wirkungsgrad und Leistung kommt auch der Autor in [20]. Neben der Effizienz, sind die Kosten für eine Kaufentscheidung ausschlaggebend. Zusammenfassend kommen die Autoren in [9] zu folgendem Fazit: „Für eine wirtschaftlich sinnvolle Industrialisierung sind verbesserte, kostengünstigere Werkstoffe mit Wirkungsgraden >15 % bei ca. 400 °C erforderlich. Diese werden nicht vor 2020-2025 erwartet.“

<sup>1</sup>NEFZ=Neuer Europäischer Fahrzyklus, WLTP=Worldwide harmonized Light duty vehicles Test Procedure, HYZEM=Hybrid technology approaching efficient Zero Emission Mobility

Die durchgeführten FEM-Simulationen der Modulbelastung bieten Einsichten in das Verformungsverhalten und können als Vorhersage von Bereichen großer Spannungen dienen. Mittels ESPI werden die simulierten Verformungen der Module bestätigt. Ebenso tritt das zuvor erwähnte Materialversagen in Bereichen auf, die in der Simulation Spannungsspitzen aufgewiesen haben. Die aufgetretenen Defekte unterstreichen die Bedeutung der genauen Kenntnis einer Belastungssituation. Vor dem Einbau eines TEG sollte das Lastprofil der Anwendung bekannt sein, um überprüfen zu können, ob sich die Anwendung aus thermomechanischer Sicht eignet. Die Kombination der eingesetzten Mess- und Simulationstechniken bietet die Möglichkeit dies zu überprüfen und gegebenenfalls entsprechende Schritte zu unternehmen, um die Realisierung zu erleichtern. Um die Verwendbarkeit eines TEG in diversen Anwendungen bereits im Entstehungsprozess zu überprüfen, kann das thermomechanische FE-Modell um ein thermoelektrisches Modell erweitert werden. Auf diese Weise wird die Betrachtung von verschiedenen Standpunkten möglich. Bereits frühzeitig könnte so die Belastbarkeit und gleichzeitig die Effizienz eines Moduls abgeschätzt werden. Zum jetzigen Zeitpunkt ist eine solche Integration nicht zielführend, da Untersuchungen bereits gezeigt haben, dass der Einbau aktuell verfügbarer Module aus energetischer Sicht nicht erfolgversprechend ist. Mit der Entwicklung neuartiger Module kann die vorliegende Arbeit als Ausgangspunkt weiterer Analysen genutzt werden.

FEM als  
Hilfsmittel

Auf Basis der Resultate werden aus thermomechanischer Sicht Optimierungsvorschläge gemacht. TEG stellen trotz aller Herausforderungen eine interessante Technologie dar. Um die Verbreitung der heute verfügbaren Module auch mittelfristig zu erhöhen, müssen neben dem Kfz weitere erfolgversprechendere Einsatzgebiete gefunden werden. Einerseits kann zwar eine angepasste Betriebsstrategie die Belastung im TEG reduzieren. Hierzu werden die Abgas- und Kühlkreislauftemperaturen eines Hybridfahrzeugs untersucht. Die Betriebsstrategie des Kfz wird aus thermomechanischer Sicht für die Anwendung optimiert und reduziert die Anzahl der Temperaturwechsel signifikant. Die Sinnhaftigkeit dieses Ansatzes von Seiten der Effizienz gilt es jedoch zu überprüfen. Andererseits wird jedoch deutlich, dass statische Belastungen von Vorteil für die Modullebensdauer sind und Anwendungen mit gleichmäßigen Temperaturen Potential zur Energierückgewinnung bieten.

Optimierungs-  
vorschläge

Allgemein zeigen die Ergebnisse, dass eine wechselnde Belastung schnell zu einer Schädigung der Module führt. Aus diesem Grund wird die Belastung einer alternativen Anwendung in einem Chemieprozess untersucht. Gleichmäßige Temperaturen der Wärmequelle und -senke versprechen eine höhere Lebensdauer mit gleichzeitig hoher elektrischer Leistung.

Andererseits wird gezeigt, dass bereits die Anpassung der Schenkelgeometrie die Spannungen sichtbar reduziert. Bei der Optimierung der Schenkel werden die Aus-

wirkungen auf den Wirkungsgrad und die Leistung des Moduls nicht berücksichtigt. Die erwähnte Möglichkeit die FEM-Simulation um ein thermoelektrisches Modell zu erweitern, könnte zukünftig auch für eine Geometrieoptimierung genutzt werden, die sowohl das Optimum im Bereich der Festigkeit, als auch im Bereich der generierten Leistung zum Ziel hat.

## 7.2 Wissenschaftlicher Beitrag der Arbeit

Analyse der  
Effizienz und  
Thermomechanik

In Rahmen dieser Arbeit wurde ein Messgerät zur Ermittlung der Effizienz eines TEG aufgebaut, das die Analysefähigkeit herkömmlicher Geräte erweitert. Die Anpassungen ermöglichen eine gezieltere Betrachtung der Module in Hinblick auf denkbare Anwendungen. Durch die zeitgleiche Untersuchung der Effizienz und der Thermomechanik stellt die Arbeit insbesondere einen Beitrag zur Bewertung der Einsatzfähigkeit und Dauerfestigkeit thermoelektrischer Generatoren dar.

Anwendungs-  
orientierte  
Belastung

Die vorgestellte Messmethodik ermöglicht die Messung der Modulverformung unter realitätsnahen Belastungen. Es können Schwachstellen im Design und Grenzen möglicher Anwendungen aufgedeckt werden. Gleichzeitig ist die Ermittlung der generierten Leistung möglich, um die Eignung eines Moduls aus thermoelektrischer Sicht zu untersuchen. Die Belastung mit einem realitätsnahen Fahrzyklus (auch andere Belastungen können vorgegeben werden) dient dazu die Einsatzfähigkeit eines thermoelektrischen Systems einer Bewertung unter realen Bedingungen zu unterziehen. Auf diese Weise können Herausforderungen im Bereich Effizienz, Moduldesign, Materialkonzept und Wahl der Anwendung parallel beleuchtet werden. Eine solche Betrachtung des Moduls aus den unterschiedlichen Blickwinkeln ist in dieser Art neu.

Damit stellen die Ergebnisse dieser Arbeit die Grundlage für kommende Modulcharakterisierungen dar. Die nächste Generation von thermoelektrischen Generatoren mit angepasstem Design wird nicht nur im Hinblick auf ihren Wirkungsgrad, sondern auch unter Betrachtung der thermomechanischen Vorgänge analysiert. Die Eignung zukünftiger Materialkonzepte für verschiedene Belastungssituationen kann frühzeitig bewertet und passende Anwendungen herausgearbeitet werden.

---

## Literaturverzeichnis

---

- [1] RODT, S. ; GEORGI, B. ; HUCKESTEIN, B. ; MÖNCH, L. ; HERBENER, R. ; JAHN, H. ; KOPPE, K. ; LINDMAIER, J.: CO<sub>2</sub>-Emissionsminderung im Verkehr in Deutschland. In: *Sachstandsbericht des Umweltbundesamt* (2010)
- [2] LEE, S. ; SPEIGHT, J. G. ; LOYALKA, S. K.: *Handbook of Alternative Fuel Technologies*. CRC Press, 2015
- [3] PAYRI, F. ; LUJÁN, J.M. ; GUARDIOLA, C. ; PLA, B.: A Challenging Future for the IC Engine: New Technologies and the Control Role. In: *Oil & Gas, Science and Technology* 70 (2015)
- [4] THIEL, C. ; SCHMIDT, J. ; ZYL, A. V. ; SCHMID, E.: Cost and well-to-wheel implications of the vehicle fleet CO<sub>2</sub> emission regulation in the European Union. In: *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 63 (2014), S. 25–42
- [5] HOFACKER, A.: Mit diesen Technologien lässt sich CO<sub>2</sub> sparen. In: *Fahrzeugtechnik* (2015)
- [6] HEIM, R. ; HANSELKA, H. ; DSOKI, C. E.: Potenzial von Radnabenantrieben für Elektrostrassenfahrzeuge. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 114 (2012), S. 752–758
- [7] ILLINGER, P.: Luxusgut Benzin. In: *Süddeutsche Zeitung* (2010)
- [8] SCHREINER, K.: *Basiswissen Verbrennungsmotor*. Vieweg & Teubner, 2011

- 
- [9] DAIMLER AG: Abschlussbericht: Industrialisierungskonzept für hochtemperaturtaugliche thermoelektrische Generatoren zur Abgaswärmenutzung in Automobilen auf Basis neuartiger Materialien. In: *Technische Informationsbibliothek, Hannover* (2013)
- [10] TRITT, T. M.: Thermoelectric phenomena, materials and applications. In: *Annual Review of Materials Research* 41 (2011), S. 433–448
- [11] SANO, S. ; H.MIZUKAMI ; KAIBE, H.: Development of high-efficiency thermoelectric power generation system / Komai'su Technical Report. 2003. – Forschungsbericht
- [12] ZHENG, X.Z. ; LIU, C. X. ; YAN, Y. Y. ; WANG, Q.: A review of thermoelectrics research: Recent developments and potentials for sustainable and renewable energy applications. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 32 (2014), S. 486–503
- [13] BALLIKAYA, S. ; YILDIRIM, S. ; CHI, H. ; UHER, C.: High Thermoelectric Performance of optimized Ba, Yb Filled and Fe Substituted Skutterudite Compounds. In: *International Conference on Thermoelectrics*, 2013
- [14] SU, X. ; YAN, Y. ; LI, H. ; TANG, X.: Enhanced Thermoelectric Properties of BaCoSbx filled Skutterudites through the Homogeneity of Ba Distribution. In: *International Conference on Thermoelectrics*, 2013
- [15] XIA, X. ; QIU, P. ; HUANG, X. ; WAN, S. ; QIU, Y. ; LI, X ; CHEN, L.: Oxidation Behavior of Filled Skutterudite CeFe<sub>4</sub>Sb<sub>12</sub> in Air. In: *Journal of Electronic Materials* 43 (2014), S. 1639–1644
- [16] KÜHN, R. ; KOEPPEN, O. ; KITTE, J.: Influence of an Optimized Thermoelectric Generator on the Back Pressure of the Subsequent Exhaust Gas System of a Vehicle. In: *Journal of Electronic Materials* 43 (2014), S. 1521–1526
- [17] RAUSCHER, M. ; RICHTER, T. ; FINSTERWALDER, F. ; SCHRAMM, D.: Challenges in Dimensioning of an Optimized Thermoelectric Generator for Waste Heat Recovery in Cars. In: *Proceedings of the 11th European Conference on Thermoelectrics* 11 (2014), S. 117–127
- [18] CRANE, D. ; LAGRANDEUR, J. ; JOVOVIC, V. ; RANALLI, M. ; ADLDINGER, M. ; POLIQUIN, E. ; DEAN, J. ; KOSSAKOVSKI, D. ; MAZAR, B. ; MARANVILLE, C.: TEG On-Vehicle Performance and Model Validation and What It Means for Further TEG Development. In: *Journal of Electronic Materials* 42 (2013), S. 1582–1591



- [19] TATARINOV, D.: *Charakterisierung und Simulation einer thermoelektrischen Generatoranlage zur Energie-Rekuperation aus Abgasen in Pkw*, Universität Duisburg-Essen, Diss., 2015
- [20] RAUSCHER, M.: *Bewertung und Vergleich von Abgaswärmenutzungstechnologien in Kraftfahrzeugen unter Berücksichtigung realer Anwendungsbedingungen*, Universität Duisburg-Essen, Diss., 2015
- [21] BARAKO, M. T. ; PARK, W. ; MARCONNET, A. M. ; ASHEGHI, M. ; GOODSON, K. E.: Thermal Cycling, Mechanical Degradation, and the Effective Figure of Merit of a Thermoelectric Module. In: *Journal of Electronic Materials* 42 (2013), S. 372–381
- [22] HORI, Y. ; KUSANO, D. ; ITO, T. ; IZUMI, K.: Analysis on thermo-mechanical stress of thermoelectric module. In: *Eighteenth International Conference on Thermoelectrics*, 1999, S. 328–331
- [23] SU, Chuqi ; XU, Meng ; TONG, Naiqiang ; CHEN, Yulian: Analysis of the Thermal Deformation in an Automotive Exhaust-Based Thermoelectric Generator. In: *SAE Technical Paper*, SAE International, 2015
- [24] EDWARDS, M. ; BRINKFELDT, K.: Thermo-mechanical modelling and design of SiGe-based thermo-electric modules for high temperature applications. In: *14th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems (EuroSimE)*, 2013, S. 1–11
- [25] FAN, X. ; CASE, E. D. ; LU, X. ; MORELLI, D. T.: Room Temperature Mechanical Properties of Natural-Mineral-Based Thermoelectrics. In: *Journal of Material Science* 48 (2013), S. 7540–7550
- [26] PICARD, M. ; TURENNE, S. ; VASILEVSKIY, D. ; MASUT, R.A.: Numerical Simulation of Performance and Thermomechanical Behavior of Thermoelectric Modules with Segmented Bismuth-Telluride-Based Legs. In: *Journal of Electronic Materials* 42 (2013), S. 2343–2349
- [27] TURENNE, S. ; CLIN, T. ; VASILEVSKIY, D. ; MASUT, R.A.: Finite Element Thermomechanical Modeling of Large Area Thermoelectric Generators based on Bismuth Telluride Alloys. In: *Journal of Electronic Materials* 39 (2010), S. 1926–1933
- [28] CLIN, T. ; TURENNE, S. ; VASILEVSKIY, D. ; MASUT, R.A.: Numerical Simulation of the Thermomechanical Behavior of Extruded Bismuth Telluride Alloy Module. In: *Journal of Electronic Materials* 38 (2009), S. 994–1001

- 
- [29] SPICHER, U. ; HADLER, J.: Effizienz und Emissionen von Kraftfahrzeugantrieben. In: *ATZ extra* (2014), S. 10–14
- [30] REIF, K. ; DIETSCHKE, K.-H.: *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. Vieweg & Teubner, 2011
- [31] TOBER, Heike: *Frag doch mal die Maus...Autos*. cbi Verlag, 2006
- [32] PUCHER, H. ; ZINNER, K.: *Aufladung von Verbrennungsmotoren Grundlagen, Berechnungen, Ausführungen*. Springer Vieweg, 2012
- [33] HEPKE, Georg: *Direkte Nutzung von Abgasenthalpie zur Effizienzsteigerung von Kraftfahrzeugen*, Technische Universität München, Diss., 2010
- [34] HAUPT, C.: *Ein multiphysikalisches Simulationsmodell zur Bewertung von Antriebs- und Wärmemanagementkonzepten im Kraftfahrzeug*, Technische Universität München, Diss., 2013
- [35] OERTEL, D.: Energiespeicher - Stand und Perspektiven / Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. 2008. – Forschungsbericht
- [36] JANKOWSKI, N. R. ; MCCLUSKEY, F. P.: A Review of Phase Change Materials for Vehicle Component Thermal Buffering. In: *Applied Energy* 113 (2014), S. 1525–1561
- [37] LÖSING, K.-H. ; LUTZ, R.: Einhaltung zukünftiger Emissionsvorschriften durch gekühlte Abgasrückführung. In: *MTZ - Motorentechnische Zeitschrift* 60 (1999), S. 470–475
- [38] TÜBER, K. ; AMBROS, P.: *Wärmemanagement des Kraftfahrzeugs V*. Expert Verlag, 2006
- [39] MÖLLER, M. E. ; BOOR, J. de ; MÜLLER, W. E. ; ALBERT, B.: High-temperature Thermoelectric Properties of the Compound  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2$  and Effects of Substitution and Doping. In: *International Conference on Thermoelectrics*, 2013
- [40] IIDA, T. ; SAKAMOTO, T. ; HIRAYAMA, N. ; ISHIKAWA, M. ; NISHIO, K. ; KOGO, Y. ; TAKANASHI, Y.: Improvement of Thermoelectric Properties of Doped N-type  $\text{Mg}_2\text{Si}$  and Component Technology to Realize a Unileg Thermoelectric Generator. In: *International Conference on Thermoelectrics*, 2013
- [41] FEDOROV, M. I. ; ZAITSEV, V. K.: Thermoelectric Materials Based on  $\text{Mg}_2\text{X}$  Compounds. In: *International Conference on Thermoelectrics*, 2012

- [42] SNYDER, G. J.: Optimizing Performance in Thermoelectric Alloys. In: *European Conference on Thermoelectrics*, 2013
- [43] CLEMENS, H.: Mobile Abwärmenutzung nach dem Rankine-Verfahren. In: *Proceedings VDI Wissensforum, Thermische Rekuperation in Fahrzeugen*, 2014
- [44] GOLDSMID, H. J.: *Recent Trends in Thermoelectric Materials Research I*. Academic Press, 2001
- [45] NOLAS, G. S. ; SHARP, J. ; GOLDSMID, H. J.: *Thermoelectrics: Basic Principles and New Materials Developments*. Springer Verlag, 2001
- [46] KLEIN, J. ; SCHANZLIN, F. ; BECKER, J.: *Kreiselpumpenlexikon*. Frankenthal, 1974
- [47] HAMM, L. ; KRAUTKRÄMER, B. ; MALIK, R. ; PEITZ, V. ; PLANK, R. ; SOLFRANK, P.: Werkstoffe und Fertigungsverfahren. In: *Vieweg Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Springer Verlag, 2013
- [48] FASCHING, G.: *Werkstoffe für die Elektrotechnik*. Springer Verlag, 1987
- [49] DALY, S.: *Automotive Air Conditioning and Climate Control Systems*. Butterworth-Heinemann, 2006
- [50] LAUBE, S. ; D.TATARINOV ; MORSCHER, M. ; BASTIAN, G.: Impact of Internal Thermal Bypasses in High Temperature TE-Modules. In: *AIP Conference Proceedings* 1449 (2012), S. 431–434
- [51] SCHMITZ, A. ; STIEWE, C. ; MÜLLER, E.: Preparation of Ring-Shaped Thermoelectric Legs from PbTe Powders for Tubular Thermoelectric Modules. In: *Journal of Electronic Materials* 42 (2013), S. 1702–1706
- [52] MAREK, R. ; NITSCHKE, K.: *Praxis der Wärmeübertragung: Grundlagen-Anwendungen-Übungsaufgaben*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2012
- [53] MORSCHER, M. ; VOGELANG, A. ; STRUCK, A. ; BASTIAN, G.: Thermal Conductivity Based on Internal Thermal Radiation and Reabsorption by Free Charge Carriers. In: *Proceedings of International Conference on Thermoelectrics 2013*, 2013
- [54] ZIOLKOWSKI, P. ; POINAS, P. ; LESZCZYNSKI, J. ; KARPINSKI, G. ; MÜLLER, E.: Estimation of Thermoelectric Generator Performance by Finite Element Modeling. In: *Journal of Electronic Materials* 39 (2010), S. 1934–1943
- [55] NOLAS, G. S. ; GOLDSMID, H. J. ; TRITT, T. M. (Hrsg.): *Thermal Conductivity: Theory, Properties, and Applications*. Springer Verlag, 2004

- [56] BERGMANN, L. ; SCHAEFER, C.: *Lehrbuch der Experimentalphysik: Festkörper.* de Gruyter, 2005
- [57] STRASSER, M.: *Entwicklung und Charakterisierung mikrostrukturierter thermoelektrischer Generatoren in Silizium-Halbleitertechnologie*, Technische Universität München, Diss., 2004
- [58] SCHIERNING, G. ; D.WOLF ; SCHMECHEL, R. ; WIGGERS, H. ; HOEGEN, H. v.: Ringvorlesung Thermoelektrik, 2009
- [59] IOFFE, A. F. ; STIL'BANS, L. S. ; IORDANISHVILI, E. K. ; STAVITSKAYA, T. S. ; GELBTUCH, A. ; VINEYARD, G.: Semiconductor Thermoelements and Thermoelectric Cooling. In: *Physics Today* 12 (1959), S. 42
- [60] SCHLECHT, S. ; BÖTTNER, H.: Energiewandler mit großem Zukunftspotenzial. In: *Nachrichten aus der Chemie* (2008), S. 136–139
- [61] SOMMERLATTE, J. ; NIELSCH, K. ; BÖTTNER, H.: Thermoelektrische Multitalente. In: *Physik Journal* 6 (2007), S. 35–41
- [62] VULERS, R.J.M. ; HOOF, C. V. ; LEONOV, V.: Thermoelectric generator hidden in a shirt with a fabric radiator. In: *AIP Conference Proceedings* 1449 (2012), S. 556–559
- [63] TRUEB, L F. ; RÜETSCHI, P.: *Batterien und Akkumulatoren: Mobile Energiequellen für heute und morgen.* Springer Verlag, 1998
- [64] ZIEGLER, H.: Grundprobleme der Thermomechanik. In: *Zeitschrift für angewandte Mathematik und Physik ZAMP* 28 (1977), S. 965–977
- [65] ZIOLKOWSKI, P.: Thermoelektrische Standardisierung: Referenzen und Methoden. In: *Thermoelektrik-Kolloquium*, 2014
- [66] MILLS, A. F. ; CHANG, B. H.: Error analysis of experiments / University of California. 2004. – Forschungsbericht
- [67] GOLDSMID, H. J.: *Introduction to Thermoelectricity.* Springer Verlag, 2010
- [68] EVANSCHITZKY, P.: *Simulationsgestützte Oberflächendiagnostik mittels Speckle-Interferometrie*, Technische Universität München, Diss., 2002
- [69] RIEMENSCHNEIDER, M.: *Echtzeitvermessung dreidimensionaler Objekte mittels Speckle-Interferometrie*, Technische Universität München, Diss., 2004
- [70] GOODMAN, J. W.: *Speckle Phenomena in Optics.* Roberts and Company Publishers, 2007

- 
- [71] RUPRECHT, M.: *Ferndiagnostik technischer Oberflächen mittels Laser-Speckle-Verfahren*, Technische Fakultät der Universität des Saarlandes Saarbrücken, Diss., 1998
- [72] Y.-L.CHANG ; WANG, W.-C.: Thermal Deformation Measurement in Thermoelectric Coolers by ESPI. In: *Proceedings of the XIth International Congress and Exposition*, 2008
- [73] MUNZ, C.-D. ; WESTERMANN, T.: Finite-Elemente-Methode. In: *Numerische Behandlung gewöhnlicher und partieller Differenzialgleichungen: Ein interaktives Lehrbuch für Ingenieure*. Springer Verlag, 2009
- [74] KÜSTLER, G.: Methodik der FEM. In: *Finite Elemente Methoden*. 2002
- [75] NEITZERT, T.: Finite-Elemente-Methode. In: *Auslegung von rotationssymmetrischen Fließpreßwerkzeugen im Bereich elastisch-plastischen Werkstoffverhaltens*. Springer Verlag, 1982
- [76] BERGMANN, L. ; SCHAEFER, C. ; RAITH, W.: *Lehrbuch der Experimentalphysik, Band 2, Elektromagnetismus*. de Gruyter, 1999
- [77] SCHMIDT, H.: Emissionsfaktoren von Otto- und Diesel-Pkw. In: *Umweltbundesamt* (2013)
- [78] KELLY, K. ; EUDY, L. ; COBURN, T.: Light-Duty Alternative Fuel Vehicles: Federal Test Procedure Emissions Results / National Renewable Energy Laboratory. 1999. – Forschungsbericht
- [79] *Kapitel Thermoelektrik im Hybrid*. In: MORSCHER, M. ; HESSE, B.: *Entscheidungen beim Übergang in die Elektromobilität*. Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2015. – ISBN 978-3-658-09577-2, S. 289–299
- [80] TATARINOV, D. ; KOPPERS, M. ; BASTIAN, G. ; SCHRAMM, D.: Modeling of a Thermoelectric Generator for Thermal Energy Regeneration in Automobiles. In: *Journal of Electronic Materials* 42 (2013), S. 2274–2281
- [81] MORSCHER, M. ; HESSE, B. ; BASTIAN, G. ; SCHRAMM, D.: Assessment of Thermoelectric Power Generation for Hybrid Electric Vehicles Based on Tracked Data. In: *Proceedings of the 11th European Conference on Thermoelectrics* (2014), S. 129–135. ISBN 978-3-319-07332-3
- [82] VERBAND DER AUTOMOBILINDUSTRIE: Der NEFZ und seine Anwendbarkeit. In: *Umwelt und Klima* (2014)

- [83] EUROPÄISCHE KOMMISSION: *RICHTLINIE 93/116/EG DER KOMMISSION vom 17. Dezember 1993 zur Anpassung der Richtlinie 80/1268/EWG des Rates über den Kraftstoffverbrauch von Kraftfahrzeugen an den technischen Fortschritt.* 1993
- [84] GULDE, D. ; BLOCH, A.: NEFZ, WLTP, RDE, PEMS - Abgastests erklärt. In: *Auto Motor und Sport* (2015)
- [85] DLR: Abschlussbericht: Industrialisierungskonzept für hochtemperaturtaugliche thermoelektrische Generatoren zur Abgaswärmenutzung in Automobilen auf Basis neuartiger Materialien. In: *Technische Informationsbibliothek, Hannover* (2013)
- [86] *Kapitel Thermoelektrische Generatoranlage zur Energierückgewinnung im Kraftfahrzeug.* In: KOPPERS, M. ; TATARINOV, D. ; BASTIAN, G.: *Schritte in die künftige Mobilität.* Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2013. – ISBN 978-3-8349-4308-8, S. 93–110
- [87] MORSCHER, M. ; HESSE, B. ; BASTIAN, G. ; SCHRAMM, D.: Analysis of Thermal and Mechanical Stress in a Thermoelectric Generator under Realistic Load. In: *Proceedings of the Materials Science & Technology Conference MS&T2013* (2013)
- [88] MORSCHER, M. ; BASTIAN, G.: Interferometric Analysis of Thermomechanical Deformations in Thermoelectric Generators. In: *Journal of Electronic Materials* 42 (2013), S. 1669–1675
- [89] SONSINO, C. M.: Schwingfestigkeit von Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- und Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-Keramiken / Fraunhofer-Institut für Betriebsfestigkeit Darmstadt. 1992. – Forschungsbericht
- [90] STENGER, R.: Electric Vehicles. In: *Europäische HyperWorks Technology Conference*, 2011
- [91] KIPP, C. ; BERGMANN, E.: Die Abgastemperatur als Maß für die Motorauslastung und den Kraftstoffverbrauch von Dieselmotoren. In: *Grundlagen der Landtechnik* 35 (1985)
- [92] ALLGEMEINER DEUTSCHER AUTOMOBIL-CLUB RESSORT VERKEHR: *Zukunftstechnologien: was uns morgen antreiben wird.* ADAC, 2009 (ADAC-Experten informieren)
- [93] ASSMANN, B. ; SELKE, P.: *Technische Mechanik 2: Band 2: Festigkeitslehre.* De Gruyter, 2013 (Oldenbourg Lehrbücher für Ingenieure). – ISBN 9783486719994

- [94] BÜRGEL, R. ; MAIER, H. J. ; NIENDORF, T.: *Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik*. Springer Verlag, 2011
- [95] CAILLAT, Thierry ; FLEURIAL, Jean-Pierre ; BORSHCHEVSKY, Alex: Development of high efficiency thermoelectric generators using advanced thermoelectric materials. In: *AIP Conference Proceedings* 420 (1998), S. 1647–1651
- [96] FELIGIOTTI, M. ; HACK, E. ; LAMPEAS, G. ; SIEBERT, T. ; PIPINO, A. ; IHLE, A.: Assessment of impact damage in CFRP by combined thermal and speckle methods. In: *Proceedings of SPIE* 7387 (2010), S. 8
- [97] FLIK, M. ; HECKENBERGER, T. ; EDWARDS, S. ; KRONER, P.: Thermomanagement für Hybridfahrzeuge. In: *Technischer Pressetag* (2009), S. 1–20
- [98] FRIEDRICH, H. ; SCHIER, M. ; HÄFELE, C. ; WEILER, T.: Strom aus Abgasen - Fahrzeuggerechte Entwicklung thermoelektrischer Generatoren. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 04/2010 (2010), S. 292–299
- [99] GRATZ, K.: *Über den Wärmetransport von Karbonaten*, Freie Universität Berlin, Diss., 2006
- [100] HIRSIG, H. M.: *Ingenieurwissen-Grundlagen*. Springer Verlag, 1995
- [101] JOREZ, S. ; DILHAIRE, S. ; LOPEZ, L. P. ; GRANBY, S. ; CLAEYS, W. ; UEMURA, K. ; STOCKHOLM, J. G.: Strain imaging in thermoelectric devices by laser probe shearography. In: *Proceedings ICT2001. 20 International Conference on Thermoelectrics*, 2001, S. 503–506
- [102] JUNIOR, C.: *Analyse thermoelektrischer Module und Gesamtsysteme*, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Diss., 2010
- [103] KITTEL, C.: *Einführung in die Festkörperphysik*. Oldenbourg Verlag, 1953
- [104] MAUGIN, G. A.: *The Thermomechanics of Plasticity and Fracture*. Cambridge University Press, 1992
- [105] MÜLLER, W. E.: Stille Reserve: Thermoelektrische Energiewandler erzeugen Strom aus Abwärme. In: *DLR Nachrichten 120 Sonderheft Energie* (2011), S. 69
- [106] PELSTER, R. ; PIEPER, R. ; HÜTTL, I.: Thermospannungen - viel genutzt und fast immer falsch erklärt! In: *Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 1/4 (2005), S. 10–22
- [107] PFISTER, B. P.: *Speckleinterferometrie mit neuen Phasenschiebemethoden*, Fakultät für Konstruktions- und Fertigungstechnik der Universität Stuttgart, Diss., 1993

- 
- [108] RIFFAT, S.B. ; MA, X.: Thermoelectrics: A Review of Present and Potential Applications. In: *Applied Thermal Engineering* 23 (2003), Nr. 8, S. 913 – 935. – ISSN 1359–4311
- [109] ROBINSON, D. W. ; REID, Graeme T. (Hrsg.): *Interferogram Analysis, Digital Fringe Pattern Measurement Techniques*. Taylor & Francis, 1993
- [110] SCHMIDT, H.: Worldwide Harmonized Light-Vehicles Test Procedure (WLTP) und Real Driving Emissions (RDE) – aktueller Stand der Diskussion und erste Messergebnisse. In: *15. Internationales Stuttgarter Symposium* (2015), S. 1403–1411. ISBN 978–3–658–08844–6
- [111] SCHRÜFER, E.: *Meß- und Automatisierungstechnik*. Springer Verlag, 1992
- [112] SNEDDON, I. N. ; NOWACKI, W. ; PARKUS, H. ; WOZNIAK, C.: *Thermomechanics in solids*. Springer Verlag, 1977
- [113] STOBER, F.: *Synthese, Charakterisierung und Untersuchung thermoelektrischer Eigenschaften ausgewählter Metallboride*, Technische Universität Darmstadt, Diss., 2012
- [114] VENKATASUBRAMANIAN, R.: Thin-Film Superlattice and Quantum-Well Structures - A new Approach to High-Performance Thermoelectric Materials. In: *Naval Research Reviews* 58 (1996)
- [115] WARD'S AUTOMOTIVE GROUP: World Vehicles in Operation by Vehicle Type. In: *Ward's Automotive Group* (2008)
- [116] ZIEGLER, H.: *An introduction to thermomechanics*. North Holland Publishing Company, 1983